

Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Bildungswissenschaften
Lehrstuhl für Lehr-Lernpsychologie

Lernen durch sinnstiftendes Zeichnen

*Eine Analyse von Blickbewegungen und Verhaltensspuren zu
theoretischen Grundlagen*

Dissertation zur Erlangung des Grades Dr. phil.

vorgelegt von Johannes Hellenbrand

geboren am 08.07.1986 in Mönchengladbach

Erstgutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. Detlev Leutner, Universität Duisburg-Essen

Zweitgutachter: Prof. Dr. Maria Opfermann, Ruhr-Universität Bochum

Tag der Mündlichen Prüfung: 09. April 2018

Danksagung

Es gibt viele Menschen, die mich während der Entstehung dieser Arbeit in vielerlei Hinsicht unterstützt haben und denen ich an dieser Stelle ganz besonders danken möchte.

Mein erster großer Dank gebührt Ihnen, Prof. Dr. Detlev Leutner, dafür, dass Sie mir die Möglichkeit gegeben haben, an Ihrem Lehrstuhl mit spannendem technischen Equipment und unter hervorragenden Arbeitsbedingungen dieses Projekt verfolgen und mich dadurch in vielerlei Hinsicht weiterbilden zu können. Weiterhin möchte ich mich bei Ihnen sowohl für die konstruktive fachliche und methodische Unterstützung als auch für Ihren stets motivierenden und aufbauenden Zuspruch zu jeglichen Phasen dieser Arbeit sowie allen Abstracts, Vorträgen und Fachartikeln bedanken.

Bei Prof. Dr. Maria Opfermann möchte ich mich herzlichst für die wunderbare Betreuung bedanken. Danke dafür, dass du stets Zeit für alle meine Fragen und Probleme hattest und mich durch deine unermüdliche Hilfe in meiner gesamten Promotionszeit nicht nur fachlich unterstützt hast. Ich kann mir gar nicht mehr vorstellen, eine Projektbesprechung ohne eine abschließende ausführliche Fußball-Fachdiskussion zu führen.

Prof. Dr. Richard Mayer, Prof. Dr. Detlev Leutner und dem Interdisziplinäres Zentrum für Bildungsforschung möchte ich dafür danken, mir den Forschungsaufenthalt an der University of California, Santa Barbara, ermöglicht zu haben. Ein besonderer Dank gebührt dir, Rich, für die gehaltvollen Gespräche während meiner Zeit in Santa Barbara sowie deiner hervorragenden Beratung, Hilfe und der freundlichen Worte, die mir sehr beim Schreiben des Fachartikels geholfen haben.

Dr. Annett Schmeck habe ich zu verdanken, dass ich überhaupt mit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens auf wissenschaftlicher Ebene in Berührung gekommen bin. Vielen Dank, dass du mich damals in das Projekt geholt und mich insbesondere in meiner Anfangszeit in allem unterstützt hast.

Ein großer Dank gilt auch allen Schulen, Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften, die an den Erhebungen teilgenommen und einen reibungslosen Ablauf ermöglicht haben. Ein weiterer Dank gilt meiner studentischen Hilfskraft Eileen Drietelaar, die sich um die Dateneingabe und in mühevoller Detailarbeit um die Aufbereitung der Blickbewegungsdaten gekümmert hat.

Weiterhin möchte ich mich ganz herzlich bei Sabrina Hilz, der guten Seele des Lehrstuhls, bedanken. Vielen Dank für die vielen netten Unterhaltungen zwischendurch und dass du mir stets bei allen großen und kleinen Verwaltungsproblemen geholfen hast – insbesondere in der Stunde der Not, als kurz vor einer Studie die Eye-Tracking Brille kaputtging.

Bei meinen Kollegen am Lehrstuhl, an der Schützenbahn und diversen anderen Universitäten, die ich während meiner Promotionszeit kennen lernen durfte, möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit, den Spaß und für die vielen fachlichen wie privaten Gespräche in der Mensa, während Betriebsausflügen und Konferenzen bedanken. Bei Inka Achtelik, Jens Fleischer und Olena Kryshko bedanke ich mich für die entspannten Mittagspausen und netten Gespräche zwischendurch. Ein besonderer Dank geht an Meike Bonefeld, Julia Bönte, Logan Fiorella, Sebastian Habig, Kelsey James, Stefan Janke, Patricia Köpfer, Christin Lotz, Sinja Müser, Sabrina Navratil, Rijana Nissing, Jocelyn Parong, Rebecca Schneider, Corinna Schuster, Ferdi Stebner und Julia Waldeyer, mit denen ich ganz besondere Momente auf diversen Konferenzen verbinde und ohne die Selbige auch nur halb so viel Spaß gemacht hätten.

Ein großer Dank gebührt auch meinen Freunden und meiner Familie. Ihr habt mir während der ganzen Promotionszeit aus der Nähe und Ferne stets Mut, seelische Unterstützung, gute Ratschläge sowie freizeitlichen Ausgleich zukommen lassen, ohne die ich das alles nicht geschafft hätte. Besonders möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken. Ihr wart und seid immer für mich da, habt mich in allem unterstützt, ermutigt und geholfen, wo ihr nur konntet – vielen Dank!

Mein größter Dank gebührt jedoch meiner Frau Meike. Danke, dass du mich von der ersten Minute an beim Promotionsvorhaben unterstützt und mir als inoffizieller Postdoc zu jeder Tages- und Nachtzeit mit Engelsgeduld bei diversen fachlichen und inhaltlichen Diskussionen, der Studienorganisation, bei Probevorträgen, dem Korrekturlesen meiner Materialien sowie der Dissertation, bei Rechenfragen und all meinen Gedanken, Problemen und Ängsten zur Seite gestanden hast. Danke für die ganzen kleinen und großen Dinge, um die du dich in letzter Zeit für mich gekümmert hast und dass du immer für mich da bist!

Danke!

Zusammenfassung

Das Lernen mit komplexen Sachtexten stellt für viele Schülerinnen und Schüler ein großes Hindernis dar. Beim verstehenden Lesen eines solchen Textes haben Lernende häufig Schwierigkeiten, verschiedene Teile des Textes zu integrieren, ein genaues Textverständnis zu entwickeln und spezifisches Wissen gezielt zu nutzen, um das Gelesene zu interpretieren (Bos, Valtin, Hußmann, Wendt & Goy, 2017; Hußmann et al., 2017; Weis, Zehner, Sälzer, Strohmaier & Pfof, 2016). Das Hinzufügen von Abbildungen zu einem Text kann zwar das fachliche Verstehen maßgeblich unterstützen (Mayer, 2009, 2014c), jedoch gibt es auch Hinweise darauf, dass Lernende vorgegebene Abbildungen häufig nur oberflächlich betrachten und verstehen (z. B. Brandstetter-Korinth, 2017; Cook, Carter & Wiebe, 2008; Hannus & Hyönä, 1999). Eine Alternative bietet die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens, bei welcher Lernende selbst repräsentationale Abbildungen zu den zentralen Sachverhalten eines Textes erstellen (Alesandrini, 1984; Carney & Levin, 2002; van Meter & Garner, 2005). Im Gegensatz zum Lernen mit einem Text und vorgegebenen Abbildungen verlassen Lernende bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens die passive Rolle eines Rezipienten von Text- und Bildmaterial und gestalten stattdessen den Lernprozess aktiv mit, indem sie ihre Aufmerksamkeit gezielt den Schlüsselstellen eines Textes zuwenden, die relevanten Informationen aus dem Text selektieren, in mentalen Repräsentationen organisieren und diese schließlich mit dem Vorwissen in ein kohärentes mentales Modell integrieren (van Meter & Garner, 2005; van Meter & Firetto, 2013). Da die Lernenden die Zeichnungen von Grund auf Stück für Stück selbst zusammensetzen und sich so intensiv mit den verschiedenen Ebenen sowie einzelnen Elementen der Abbildung und derer Zusammenhänge auseinandersetzen, erhalten sie zudem über den Visualisierungsprozess einen intuitiven Zugang, um Bildinformationen aus komplexen Abbildungen zu entnehmen.

Die Wirksamkeit des sinnstiftenden Zeichnens wird im zugrundeliegenden *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013) darauf zurückgeführt, dass Lernende beim Prozess der Bildgenerierung einen dreiphasigen Selbstregulationskreislauf durchlaufen, welcher die Ausführung der kognitiven Prozesse steuert. Weiterhin werden durch den Selbstregulationskreislauf metakognitive Prozesse der Selbstüberwachung und -regulation angestoßen, welche dafür verantwortlich sind, dass die Aufmerksamkeit der Lernenden verstärkt auf die zentralen Stellen des zu bearbeitenden Textes gelenkt wird und sinnstiftende Selektions-, Organisations- und Integrationsprozesse stattfinden, sodass unter Einbezug des Vorwissens ein kohärentes mentales Modell konstruiert werden kann. Durch das Erstellen

einer Zeichnung erhalten die Lernenden außerdem eine direkte Rückmeldung darüber, ob die wesentlichen Aspekte des Textes erfasst und verstanden worden sind oder ob sich erneut mit dem Text auseinandergesetzt werden muss.

Bisherige Befunde zum sinnstiftenden Zeichnens legen nahe, dass die Lernstrategie dann ihr volles Potenzial entfalten kann, wenn Lernende qualitativ hochwertige Zeichnungen erstellen können, ohne sich beim Visualisierungsprozess kognitiv zu überlasten (Schmeck, 2010). Unter diesen Voraussetzungen kann das sinnstiftende Zeichnen sowohl das Textverständnis als auch die Transferleistungen fördern (für eine Übersicht siehe Fiorella & Mayer, 2015; Leutner & Schmeck, 2014; van Meter & Firetto, 2013). Weiterhin erweist sich die Qualität der von den Lernenden erstellten Zeichnungen als geeigneter Prädiktor für den Lernerfolg (*prognostic drawing principle*; Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn, Mayer, Thillmann, Leopold & Leutner, 2010).

Während die Lernförderlichkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens empirisch gut belegt ist, gibt es bisher jedoch keine empirischen Belege für die in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen angenommenen zugrundeliegenden kognitiven und metakognitiven Prozesse. Anhand der Analyse von Blickbewegungen und Verhaltensspuren sind in der vorliegenden Arbeit Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse während des sinnstiftenden Zeichnens ausgemacht worden, sodass die theoretischen Annahmen im *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013) hinsichtlich des Selbstregulationskreislaufs und des Einflusses des Vorwissens auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse empirisch überprüft werden konnten.

In der in dieser Arbeit präsentierten ersten und zweiten Studie lag der Fokus daher auf der Frage, welche Blickbewegungsmuster sich bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens nachweisen lassen und inwiefern sich diese Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden von denen solcher Lernenden unterscheiden, die vorgegebene Abbildungen zu einem Text erhalten (Studie I) oder die Lernstrategie des Zusammenfassens ausführen (Studie II). Weiterhin wurde in beiden Studien untersucht, inwiefern sich die Lernenden im Hinblick auf den Lernerfolg unterscheiden und ob bei Lernenden, welche sinnstiftende Zeichnungen erstellen, die Qualität der Zeichnungen prädiktiv für den Lernerfolg ist. Die Ergebnisse der Blickbewegungsanalysen und Lernerfolgstests legen nahe, dass, im Vergleich zu einer klassischen multimedialen Lernumgebung oder der Anwendung der Lernstrategie des Zusammenfassens, sinnstiftendes Zeichnen zu einer strategisch fokussierteren Nutzung der kognitiven Prozesse des Selektierens

und Integrierens führt. Die gefundenen Blickbewegungsmuster für die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens stehen dabei im Einklang mit den Annahmen des theoretischen Modells: Lernende, welche sinnstiftende Zeichnungen zu einem Text erstellten, setzten sich wiederholt intensiv mit dem Text und den sich in der Entstehung befindenden Abbildungen auseinander und richteten dabei ihre Aufmerksamkeit verstärkt auf die zentralen Stellen des Textes, sodass ein höherer Anteil an sinnstiftenden Verknüpfungen zwischen depiktiven und deskriptiven Informationen erzeugt werden konnte. Weiterhin erwies sich die Qualität der während des Lernens erstellen Zeichnungen als prädiktiv für den Lernerfolg.

In der dritten Studie dieser Arbeit wurde schließlich der Einfluss des Vorwissens auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse während des sinnstiftenden Zeichnens untersucht. Dabei konnte erwartungsgemäß gezeigt werden, dass das Vorwissen einen entscheidenden Einfluss auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse während des sinnstiftenden Zeichnens ausübt und damit auch einen entscheidenden Einfluss auf die Konstruktion eines kohärenten mentalen Modells nimmt. Die Auswertung der Blickbewegungsmuster und Verhaltensspuren von Lernenden mit hohem und geringem Vorwissen bei der Strategieanwendung zeigen erwartungskonform, dass Lernende mit hohem Vorwissen nicht nur qualitativ hochwertigere Zeichnungen während des Lernens erstellen konnten und ein höheres Textverständnis und Transferwissen erwarben als Lernende mit geringem Vorwissen, sondern außerdem ausgeprägtere Selektionsprozesse aufwiesen. Im Hinblick auf sinnstiftende Integrationsprozesse konnte jedoch kein Unterschied zwischen Lernenden mit hohem und geringem Vorwissen bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens festgestellt werden. Die Qualität der Zeichnungen war wiederum positiv mit dem Lernerfolg verbunden.

Insgesamt weisen die empirischen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit auf die Gültigkeit der im *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013) getroffenen Annahmen hinsichtlich des Selbstregulationskreislaufs und des Einflusses des Vorwissens auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse hin. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Lernende besonders dann im Hinblick auf ihr Textverständnis vom Einsatz der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren, wenn sie in der Lage sind, qualitativ hochwertige Zeichnungen zu erstellen. Zudem erwies sich sinnstiftendes Zeichnen für Lernende mit geringem Vorwissen als sinnvoll, um ihren Wissensrückstand im Vergleich zu Strategieanwendenden mit hohem Vorwissen auszugleichen. Damit bietet sich der Einsatz der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens im schulischen Kontext insbesondere bei leistungsheterogenen Klassen an, um komplexe Sachtexte sinnstiftend zu erarbeiten.

Abstract

The requirements of a complex scientific text can be a major obstacle for students who study on their own for deep level understanding. In the process of making sense of a text, learners often struggle to integrate different parts of the text, to develop a precise text comprehension, and to use specific textual knowledge to interpret what they have just read (Bos, Valtin, Hußmann, Wendt, & Goy, 2017; Hußmann et al., 2017; Weis, Zehner, Sälzer, Strohmaier, & Pfof, 2016). Although providing pictures in addition to a text can promote learning (Mayer, 2009, 2014c), students tend to look at pictures only in a superficial way and often have difficulties interpreting them (e.g., Brandstetter-Korinth, 2017; Cook, Carter, & Wiebe, 2008; Hannus & Hyönä, 1999). A promising approach to improve learning in this regard is to encourage students to draw their own representational pictures, which reflect the main ideas of the text (Alesandrini, 1984; Carney & Levin, 2002; van Meter & Garner, 2005). Contrary to learning with author-provided pictures that are just added to a text, learners who engage in generative drawing are no longer passive consumers of information, but are actively involved in generative processing such as selecting key elements and relations, organizing them into mental representations, and integrating the mental representations with each other and with prior knowledge into a coherent mental model (van Meter & Firetto, 2013; van Meter & Garner, 2005). Since learners deal with the individual elements of the picture and their relations more intensively and create their drawings piece by piece, they also reach a deeper level of understanding in how to deal with complex pictures and how to extract information from these pictures.

The cognitive and metacognitive processes underlying generative drawing are described on a theoretical basis in the *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013), in which the processes of selecting, organizing, and integrating are interpreted in terms of self-regulated learning. When learners engage in generative drawing, they undergo a self-regulation cycle that begins with setting performance standards for the drawing by deciding on how many details need to be included and how to express relations between different parts. Metacognitive processes of self-monitoring and self-regulation are triggered, when learners compare their in-progress work to the standards set earlier. If learners are unable to reach the standards or have difficulties to externalize the mental model, metacognitive control guides them back to the instructional material to re-engage in the cognitive processes of selecting, organizing, and integrating in order to revise their mental model. Thus, van Meter and Firetto (2013) predict that, by using the drawing strategy, learners'

attention is directed towards key elements and relations in the text and that learners who generate drawings on their own use self-monitoring and self-regulation processes more frequently than learners who do not use this strategy.

Research shows that generative drawing is more likely to develop its full potential when the drawing process itself is supported. Providing a legend showing all relevant elements for drawing, for example, can reduce extraneous cognitive processing that the mechanics of drawing itself induce (Schmeck, 2010). Under this boundary condition, generative drawing as a self-regulated learning strategy can foster deep level understanding that leads to better learning outcomes in retention and transfer tests (for an overview see Fiorella & Mayer, 2015; Leutner & Schmeck, 2014; van Meter & Firetto, 2013). Moreover, the quality of learners' drawings during learning predicts the quality of their learning outcomes (*prognostic drawing principle*; Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn, Mayer, Thillmann, Leopold, & Leutner, 2010).

While there is strong evidence that generative drawing promotes a deeper understanding of the learning materials, there is a lack of empirical evidence for the proposed underlying cognitive and metacognitive processes. To shed more light on the theoretical assumptions made in the *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013) concerning the self-regulation cycle and the influence of prior knowledge on cognitive processing, three studies were conducted, in which students' learning processes were analyzed as they engaged in generative drawing using eye-tracking measures and students' learning outcomes using posttest measures.

The purpose of the first and second study presented in this thesis was to examine if students exhibit different eye-movement patterns as indicators of cognitive processing during learning when they generate drawings than when they are given author-generated pictures in addition to a text (Study I) or when they generate written summaries (Study II). Furthermore, in both studies was examined how learners differed in learning outcome performance. A secondary goal was to determine whether the quality of the drawings was predictive for the quality of learning outcomes. The results of both experiments show that learners who engaged in generative drawing during reading a scientific text displayed more strategically focused processing of the text by focusing more attention on relevant text passages and connections between generated drawings and relevant text passages than learners who received a different instructional strategy (such as providing pictures in Study I) or who were prompted to use a different generative learning strategy (such as writing summaries in Study

II). Thus, the results are in line with the assumptions made in the *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013): Learners who engage in generative drawing are more likely to direct their attention towards key elements and their relations in the text and to engage in meaningful self-monitoring and self-regulation processes in order to externalize the drawing. Moreover, the quality of the drawings was positively associated with the quality of learning outcomes.

The purpose of the third study presented in this thesis was to investigate the impact of prior knowledge on generative processing that leads to mental model construction during generative drawing. As expected, learners with high prior knowledge not only created drawings of significantly higher quality during learning and scored higher on all learning outcome measures than learners with low prior knowledge, but they also were better able to distinguish between important and less important information in the text, indicating more profound selection processing. However, both learners with high and low prior knowledge did not differ in making meaningful connections between their drawings and corresponding text passages. Furthermore, the quality of the drawings proved to be predictive of the quality of learning outcomes.

Overall, the empirical findings of this thesis contribute to evaluating the theoretical assumptions of the *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013) with regard to the underlying cognitive and metacognitive processes and the impact of prior knowledge on mental model construction. Moreover, learners benefit most from using the drawing strategy, when they are able to produce high-quality drawings. In particular, generative drawing is a strategy that is suitable for low-prior-knowledge learners in order to catch up with the knowledge that learners with high prior knowledge already possess before learning to a certain extent. Thus, generative drawing as a self-regulated learning strategy should be explicitly used in performance-heterogeneous classes at school in order to help students deal with complex scientific texts.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	ii
Zusammenfassung	iv
Abstract	vii
1 Allgemeine Einführung	1
1.1 Multimediales Lernen.....	5
1.1.1 Die Cognitive Theory of Multimedia Learning.....	6
1.1.2 Das Integrated Model of Text and Picture Comprehension	10
1.1.3 Wirksamkeit des Lernens mit Text und vorgegebenen Bildern	14
1.2 Die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens	17
1.2.1 Die Generative Theory of Drawing Construction	18
1.2.2 Das Cognitive Model of Drawing Construction.....	21
1.2.3 Empirische Befunde zur Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens.....	26
1.3 Eye-Tracking als Methode zur Analyse visueller Aufmerksamkeit.....	32
1.3.1 Grundlagen zur Erfassung von Blickbewegungen	32
1.3.2 Blickbewegungen als Indikatoren für kognitive Verarbeitung.....	35
1.3.3 Empirische Befunde von Blickbewegungsmessungen in multimedialen Lernumgebungen	36
1.4 Struktur und zentrale Forschungsfragen der Arbeit	41
1.5 Literaturverzeichnis	47
2 Study I & II: How Generative Drawing Works: An Eye-Tracking Analysis	67
2.1 Theoretical Background	68
2.2 Experiment 1	76
2.2.1 Method.....	77
2.2.2 Results and Discussion	84
2.3 Experiment 2	88
2.3.1 Method.....	88
2.3.2 Results and Discussion	91

2.4	General Discussion	95
2.5	References	99
3	Study III: Cognitive Processing of Experts and Novices During Generative Drawing: An Eye-Tracking Analysis.....	106
3.1	Theoretical Background	107
3.2	Method.....	113
3.3	Results	118
3.4	Discussion.....	122
3.5	References	126
4	Zusammenfassende Diskussion	131
4.1	Zentrale Ergebnisse	132
4.1.1	Zentrale Ergebnisse der ersten Studie	132
4.1.2	Zentrale Ergebnisse der zweiten Studie.....	134
4.1.3	Zentrale Ergebnisse der dritten Studie	137
4.2	Empirische und theoretische Implikationen	138
4.3	Praktische Implikationen	143
4.4	Limitationen und Ausblick	144
4.5	Literaturverzeichnis	151
	Tabellenverzeichnis	159
	Abbildungsverzeichnis	160
	Abkürzungsverzeichnis.....	162
	Anhang.....	163
	Anhang A: Ausgewählte Erhebungsinstrumente.....	163
	Anhang B: Lerntext zur Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren	168
	Anhang C: Ausgewählte Beispiele der Kodiermanuale	171

1 Allgemeine Einführung

»Legere enim et non intellegere neglegere est¹.«

(Disticha Catonis, epistula; zitiert nach Grebe, 1982, S. 20)

Eines der ältesten Medien zur Übermittlung von Wissen ist der geschriebene Text. Doch obwohl Texte im Bildungskontext nach wie vor omnipräsent sind, stellen insbesondere komplexe Texte für Lernende häufig ein großes Hindernis dar. In großen internationalen Vergleichsstudien wie dem *Programme for International Student Assessment* (PISA) oder der *Internationalen Grundschul-Lese-Untersuchung* (IGLU) wurden in den letzten Jahren daher entsprechende Untersuchungen durchgeführt, um Aufschluss über die Lesekompetenz von Schülerinnen und Schülern zu erlangen, die fächerübergreifend als eine wesentliche Voraussetzung für erfolgreiches Lernen angesehen wird (Artelt et al., 2007; Weis, Zehner, Sälzer, Strohmaier & Pfof, 2016). Lesekompetenz wird dabei nicht nur als Fähigkeit verstanden, einzelne Sätze und Texte flüssig zu lesen und zu dekodieren, sondern auch als die aktive Bedeutungserschließung aus Texten, welche das Verstehen, Interpretieren, Analysieren und Kritisieren des Textes beinhaltet (Nitz, 2012; Weis et al., 2016).

Die zuletzt 2015 durchgeführte PISA-Erhebung zur Lesekompetenz der Fünfzehnjährigen in Deutschland konnte zeigen, dass sich die Lesekompetenz der Schülerinnen und Schüler im Vergleich zur PISA-Erhebung von 2000 erheblich verbessert hat und dass diese auch im internationalen Vergleich über dem OECD-Durchschnitt liegt², allerdings weicht die durchschnittliche Lesekompetenz der Schülerinnen und Schüler an nicht gymnasialen Schularten (Hauptschule, Schule mit mehreren Bildungsgängen, Integrierte Gesamtschule und Realschule) beträchtlich von der durchschnittlichen Lesekompetenz der Schülerinnen und Schüler an Gymnasien ab (Weis et al., 2016). Eine hohe Streuung der Leistungen im Vergleich zu den anderen teilnehmenden Ländern zeigen auch die aktuellen IGLU-Ergebnisse (Hußmann et al., 2017): Einerseits ist der Anteil an sehr guten Leserinnen und Lesern gestiegen, andererseits aber auch der Anteil der sehr schwachen. Demnach erreichen circa 19 % der Viertklässlerinnen und Viertklässler nicht Kompetenzstufe III der Lesekompetenz, welche

¹ „Denn (etwas) lesen und es nicht verstehen, bedeutet soviel, wie es nicht gelesen zu haben.“ Übersetzt nach Grebe (1982, S. 55).

² Der Leistungsmittelwert für Deutschland beträgt 509 Punkte, während der Mittelwert der Jugendlichen in den OECD-Staaten bei 493 Punkte liegt (Weis, Zehner, Sälzer, Strohmaier & Pfof, 2016).

die Fähigkeiten von Schülerinnen und Schülern nachweist, ein genaues Verständnis von Texten mit mittleren Komplexitätsgraden zu entwickeln, verschiedene Teile eines Textes zu integrieren (auch wenn die einzubeziehende Information wenig offensichtlich ist) und spezifisches Wissen gezielt zu nutzen, um das Gelesene zu interpretieren (Artelt, Schneider & Schiefele, 2002; Hußmann et al., 2017). Dabei stellt insbesondere das Lesen von Sachtexten die Schülerinnen und Schüler vor große Schwierigkeiten, wohingegen sie deutlich besser beim Lesen literarischer Texte abschneiden (Bos, Valtin, Hußmann, Wendt & Goy, 2017). Da das Lesen von Sachtexten fächerübergreifend allerdings einen wesentlichen Bestandteil des Lernens in der Sekundarstufe I aller Schulformen ausmacht, sehen Bos et al. (2017) im schwachen Abschneiden im Bereich der Lesekompetenz von Sachtexten eine große curriculare Herausforderung.

Vor diesem Hintergrund liegt ein Schwerpunkt im Forschungsbereich der Bildungswissenschaften und Fachdidaktiken auf der Erforschung geeigneter und empirisch abgesicherter Methoden, welche Lernenden den Umgang mit komplexen Sachtexten erleichtern können. Neben der Förderung des Fachsprachegebrauchs im Unterricht als einem Einflussfaktor auf das Textverstehen (z. B. Leisen, 2011; Nitz, 2012; Rous, 2016) stellen insbesondere der Einsatz geeigneter Lernstrategien (z. B. Fiorella & Mayer, 2015; Leopold, 2009) und die angemessene Aufbereitung des Lernmaterials (z. B. Mayer & Alexander, 2017) prominente Ansätze zur Förderung des Textverstehens im wissenschaftlichen Diskurs dar. Insbesondere die Wirksamkeit des multimedialen Lernens, bei welchem Informationen nicht nur in Form eines Textes, sondern mithilfe verschiedener Repräsentationsmodi dargeboten werden, wird seit einigen Jahrzehnten im Hinblick auf ein erhöhtes Textverständnis wissenschaftlich intensiv untersucht (z. B. Leutner & Opfermann, 2013; Leutner, Opfermann & Schmeck, 2014; Mayer, 2009, 2014c; Scheiter, Eitel & Schüler, 2016; Schnotz & Bannert, 1999a, 2003; Schnotz, 2014). Einen stabilen Befund stellt dabei z. B. das *Multimedia-Prinzip* (Butcher, 2014; Mayer, 2009) dar, welches besagt, dass Lernende besser mit einer Kombination bestehend aus einem Text und einer oder mehrerer Abbildungen lernen als mit Texten allein. Den theoretischen Hintergrund zum multimedialen Lernen bilden z. B. die *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (Mayer, 2009, 2014a) oder das *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* (Schnotz, 2002, 2014; siehe auch Schnotz und Bannert, 1999a, 1999b, 2003). Beide Modelle nehmen an, dass Text- und Bildinformationen zunächst selektiert, im Arbeitsgedächtnis unabhängig voneinander zu einer Text- bzw. Bildrepräsentation organisiert und schließlich zusammen in ein depiktives mentales Modell integriert werden.

Während auf textueller Ebene komplexe Prozesse und Abläufe detailliert beschrieben werden können, bieten Abbildungen die Möglichkeit, relationale Beziehungen übersichtlich darzustellen (Larkin & Simon, 1987). Weiterhin können geeignete Abbildungen während des Lernens bei Bedarf als eine leicht zugängliche visuelle Repräsentation des Textinhaltes herangezogen werden, um z. B. Detailverbesserungen am mentalen Modell durchzuführen (Hochpöchler et al., 2013; Schnotz et al., 2014). Da die kognitiven Anforderungen, die das verstehende Lesen an Lernende stellt, durch das Hinzufügen von Abbildungen zu einem Sachtext reduziert werden können, bilden Abbildungen eine geeignete Verstehenshilfe für das Lernen mit komplexen Sachtexten – insbesondere dann, wenn Lernende nur über ein geringes domänenspezifisches Vorwissen verfügen (Schmeck, 2010).

Dementsprechend werden verschiedenste Abbildungen im Schulunterricht eingesetzt. Im Biologieunterricht lassen sich z. B. visuelle Repräsentationen von Fachinhalten in realistischen Fotografien, über abstrakte Schaubilder und Prozessabbildungen bis hin zu hoch konventionalisierten Diagrammen finden (Brandstetter-Korinth, 2017). Allerdings sind nicht alle Abbildungen gleichermaßen geeignet, um zum Verstehensprozess Lernender beizutragen. Schnotz und Bannert (1999a) weisen darauf hin, dass die Bildoberflächenstruktur zumindest teilweise auf die Struktur des mentalen Modells abgebildet wird und dass somit die Darbietung einer nicht adäquaten Abbildung mit der erforderlichen Konstruktion eines mentalen Modells sogar interferieren kann. Doch auch wenn zu einem Text eine geeignete Abbildung hinzugefügt wird, kann die Lernwirksamkeit der Text-Bild-Kombination dadurch gehemmt sein, dass Lernende der Abbildung nur einen geringen Teil ihrer Aufmerksamkeit zukommen lassen oder ihnen gar das Wissen fehlt, die Bildinformationen richtig zu „lesen“ (z. B. Brandstetter, Sandmann & Florian, 2017; Brandstetter-Korinth, 2017; Cheng & Gilbert, 2014; Chittleborough & Treagust, 2008; Cook, Carter & Wiebe, 2008; Hannus & Hyönä, 1999; Kragten, Admiraal & Rijlaarsdam, 2015; Seufert, 2003).

Daher hat in den letzten Jahren die Frage danach, ob Abbildungen als sinnvolle Ergänzung zu einem komplexen Sachtext immer vorgegeben sein müssen oder nicht auch von den Lernenden selbst in sinnstiftender Weise erstellt werden können, viel Aufmerksamkeit in der Multimedia-Forschung erhalten (für einen Überblick siehe Fiorella & Mayer, 2015; Leutner & Schmeck, 2014; van Meter & Firetto, 2013). Bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens verlassen Lernende die passive Rolle eines Rezipienten von Text- und Bildmaterial und nehmen stattdessen eine aktive Rolle im Lernprozess ein, indem sie selbst für die Erstellung sinnstiftender Abbildungen zu einem Text verantwortlich sind. In-

dem Lernende aktiv am Entstehungsprozess der Abbildung beteiligt sind, erhalten sie insbesondere einen Zugang zu komplexen Abbildungen, da sie diese von Grund auf Stück für Stück selbst zusammensetzen und so sich intensiv mit den verschiedenen Ebenen sowie einzelnen Elementen der Abbildung und ihrer Zusammenhänge auseinandersetzen.

Wie bei der Verwendung von klassischem multimedialen Lernmaterial wird in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen angenommen (d. h. in der *Generative Theory of Drawing Construction* von van Meter & Garner, 2005, bzw. im *Cognitive Model of Drawing Construction* von van Meter & Firetto, 2013), dass Lernende zu den kognitiven Verarbeitungsprozessen des Selektierens, Organisierens und Integrierens der dargebotenen verbalen und visuellen Informationen angeregt werden. Im Gegensatz zu vorgegebenen Text-Bild-Kombinationen erhalten Lernende jedoch durch das Erstellen einer sinnstiftenden Zeichnung direkt eine Rückmeldung darüber, ob die wesentlichen Aspekte eines Textes erfasst und verstanden worden sind. Diese automatisch angeregte Selbstüberwachung und die daraus resultierende Regulation des Lernprozesses stellt demnach die besondere Stärke des sinnstiftenden Zeichnens dar (van Meter & Garner, 2005; van Meter & Firetto, 2013). Im Hinblick auf die eingangs beschriebene Problematik zum Lernen mit komplexen Sachtexten legt daher die aktuelle Forschung insbesondere im Kontext naturwissenschaftlicher Bildung nahe, dass Lernende das sinnstiftende Zeichnen in ihr persönliches Lernstrategierepertoire aufnehmen sollten (Ainsworth, Prain & Tytler, 2011; Fiorella & Mayer, 2015).

Während die Lernförderlichkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens empirisch gut belegt ist³, gibt es bisher keine empirischen Belege für die in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen angenommenen zugrundeliegenden kognitiven Prozesse. In der vorliegenden Arbeit soll dieser Aspekt daher näher beleuchtet werden, indem erstmalig anhand von Blickbewegungsanalysen und Verhaltensspuren Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse während des sinnstiftenden Zeichnens bestimmt werden. Da die theoretischen Modelle zum sinnstiftenden Zeichnen maßgeblich von Mayers (2009, 2014a) und Schnotz' (2014) Theorien multimedialen Lernens geprägt sind, werden zunächst beide Modelle ausführlich vorgestellt und die Wirksamkeit des Lernens mit einer Text-Bild-Kombination näher beleuchtet. Anschließend erfolgen die Vorstellung des theoretischen Hintergrunds zum sinnstiftenden Zeichnen sowie eine Übersicht zu aktuellen empirischen Befunden. Schließlich werden die Möglichkeiten und Limitationen der Methodik des Eye-

³ Eine Übersicht über aktuelle empirische Befunde zum sinnstiftenden Zeichnen bieten Fiorella und Mayer (2015), welche die Wirksamkeit des sinnstiftenden Zeichnens im Median mit einer mittleren Effektstärke von $d = 0.40$ angegeben.

Trackings im Bereich des multimedialen Lernens erläutert, bevor zum Abschluss des Kapitels die Struktur und die zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit dargelegt werden.

1.1 Multimediales Lernen

“People learn more deeply from words and pictures than from words alone” (Mayer, 2014a, S. 43). Dieses von Mayer (2014a) formulierte *Multimedia-Prinzip* stellt einen der zentralen Aspekte multimedialen Lernens dar (für eine Übersicht siehe Butcher, 2014). Allgemein bezeichnet multimediales Lernen „Lernen anhand von Material, bei dem Informationen in mehreren Repäsentationsmodi (in der Regel verbal und piktorial) dargestellt sind“ (Leutner et al., 2014, S. 302). Ein Video, welches neben statischen oder animierten Bildern auch eine Kommentierung enthält, oder ein Vortrag, der z. B. durch eine PowerPoint-Präsentation oder das Anschreiben an eine Tafel unterstützt wird, sind Beispiele für eine Multimedia-Präsentation. Aber auch in anderen Lernsituationen findet multimediales Lernen statt – etwa, wenn Lehrbuchtexte zusätzliche erklärende Fotografien oder Abbildungen enthalten oder Lernende selbst Zeichnungen zu einem Sachtext erstellen. Kurzum: In den meisten Lernsituationen setzen sich Lernende zur Informationsgewinnung mit Texten und Abbildungen auseinander. Aus kognitionspsychologischer Sicht stehen also die Fragen im Vordergrund, in welchem Format Informationen präsentiert werden sollten, über welche Sinneskanäle sie optimal aufgenommen und verarbeitet werden können und wie Informationsaufnahme- und der Informationsverarbeitungsprozesse optimal gestaltet und gesteuert werden können, so dass möglichst effektiv und effizient Lernen stattfindet (Klauer & Leutner, 2012; Mayer, 2014b).

Allerdings ist das bloße Hinzufügen von Abbildungen zu einem Text noch kein Garant für eine bessere Lernleistung⁴. Als besonders lernwirksam in multimedialen Lernumgebungen haben sich Abbildungen erwiesen, welche räumliche Beziehungen funktionaler Elemente zueinander bildlich darstellen. Carney und Levin (2002) bezeichnen diese Abbildungen als „repräsentationale Bilder“, Schnotz (2002) als „realistische Bilder“. Eine Erklärung dafür, warum eine Kombination aus einem Text und einer Abbildung lernförderlich sein kann, liefern z. B. Mayers *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (2009, 2014a) und Schnotz‘ (2002, 2014; siehe auch Schnotz und Bannert, 1999a, 1999b, 2003) *Integrated Model of Text*

⁴ Es sei darauf verwiesen, dass in bestimmten Situationen nur ein Text oder nur ein Bild lernförderlicher sein können als eine Kombination aus beidem. Als Beispiele seien hier der von Kalyuga und Sweller (2014) beschriebene *redundancy effect* und der *expertise reversal effect* (Kalyuga, 2014) genannt.

and Picture Comprehension, welche den gesamten Lernprozess, von der Aufnahme der Informationen über die Sinnesorgane bis hin zur Abspeicherung des Gelernten im Langzeitgedächtnis, theoretisch aufarbeiten.

Bei der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens erhalten Lernende keine repräsentationalen Bilder zusätzlich zu einem Text, sondern erstellen diese selbst. Somit ist auch sinnstiftendes Zeichnen dem multimedialen Lernen zuzuordnen. Da die theoretischen Modelle zum sinnstiftenden Zeichnen ihrerseits auf den Grundlagen der *Cognitive Theory of Multimedia Learning* und des *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* beruhen, werden beide Modelle im Folgenden näher vorgestellt.

1.1.1 Die Cognitive Theory of Multimedia Learning

Die *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML; Mayer, 2009, 2014a) beschreibt die kognitive Verarbeitung multimedialer Lerninhalte ausgehend von der externen Darbietung piktorialer und verbaler Repräsentationen über die Konstruktion eines mentalen Modells bis hin zur Speicherung der erworbenen Wissensinhalte im Langzeitgedächtnis (Scheiter, 2017). Der CTML liegen dabei drei zentrale Annahmen zugrunde: (1) Die Verarbeitung von visuellen und auditiven Informationen erfolgt in zwei separaten Kanälen (*dual-channel assumption*; Baddeley, 1992; Baddeley, Eysenck & Anderson, 2009; Baddeley, 2012; Clark & Paivio, 1991; Paivio, 1986, 2006); (2) Die Menge an Informationen, die in jedem Kanal gleichzeitig verarbeitet werden kann, ist begrenzt (*limited-capacity assumption*; Baddeley, 1992, 1999; Chandler & Sweller, 1991; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011); (3) Lernende sind aktiv am Informationsverarbeitungsprozess, d. h. dem Selektieren, Organisieren und Integrieren relevanter Informationen in kohärente mentale Repräsentationen, beteiligt (*active-processing assumption*; Mayer, 2008; Wittrock, 1990).

Basierend auf Paivios *dualer Kodierungstheorie* (Clark & Paivio, 1991; Paivio, 1986, 2006) und Baddeleys *Modell zum Arbeitsgedächtnis* (Baddeley, 1992; Baddeley et al., 2009; Baddeley, 2012) wird in der CTML angenommen, dass das menschliche Informationsverarbeitungssystem ein nonverbales System (visueller / piktorialer Kanal) und ein verbales System (auditiver / verbaler Kanal) besitzt. Demnach werden über die Augen Informationen im visuellen Kanal aufgenommen (wie z. B. Bilder, Animationen, Videos oder Text), während über die Ohren Informationen im auditiven Kanal aufgenommen werden (wie z. B. gesprochene Worte, Klänge). Diese Informationen werden anschließend im Arbeitsgedächtnis zu

einem verbalen und einem piktorialen Modell organisiert. Im Arbeitsgedächtnis können jedoch im Zuge der Modellbildungen die in einem System aufgenommenen Informationen zusätzlich in das jeweils andere System überführt werden, sofern dafür kognitive Ressourcen zur Verfügung stehen (*cross-channel representations*). So wird z. B. geschriebener Text über die Augen in das nonverbale System aufgenommen, jedoch können diese aufgenommenen Bilder in Form von Buchstaben im Arbeitsgedächtnis zu einer gesprochenen Lautfolge konvertiert werden, sodass sich daraus ein verbales anstelle eines piktorialen Modells bilden lässt. Umgekehrt kann aus über die Ohren aufgenommenen gesprochenen Worten im Arbeitsgedächtnis ein mentales Bild entstehen, was zur Konstruktion eines piktorialen Modells führt (Mayer, 2009, 2014a).

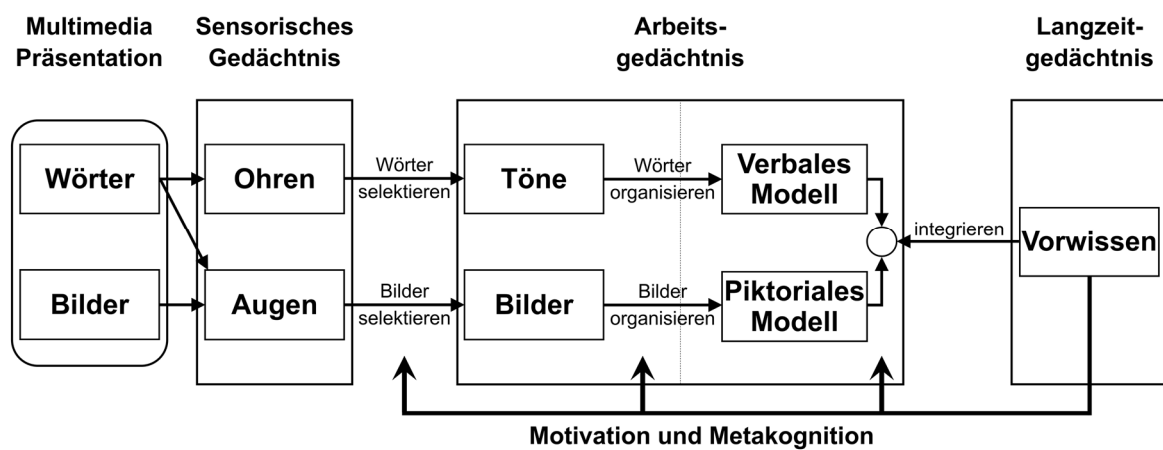


Abbildung 1: Die Cognitive Theory of Multimedia Learning (Mayer, 2014a, S. 66; eigene Übersetzung).

Gemäß dem *Modell zum Arbeitsgedächtnis* (Baddeley, 1992, 1999; Baddeley et al., 2009; Baddeley, 2012) und der *Cognitive Load Theory* (Chandler & Sweller, 1991; Sweller et al., 2011) ist allerdings die Verarbeitungskapazität beschränkt, sodass auch die Menge an Informationen begrenzt ist, die in jedem Kanal gleichzeitig verarbeitet werden kann. Komplexe Lernmaterialien können dementsprechend nur sequentiell im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden. Das Vorwissen beeinflusst jedoch die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, sodass dessen Grenze intraindividuell und interindividuell variieren kann. Lernende mit umfangreichem Vorwissen können demnach mehr Informationen gleichzeitig verarbeiten, da sie über mehr domänenspezifisches Wissen und komplexere kognitive Schemata verfügen als Lernende mit geringem Vorwissen (z. B. Braune & Foshay, 1983; Cook et al., 2008; Snyder, 2000). Aufgrund der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses müssen Lernende daher Entscheidungen darüber treffen, welche Informationen besonders wichtig und in welchem

Maße Verknüpfungen zwischen diesen Informationen und bereits vorhandenem Wissen herzustellen sind. Aus diesem Grunde spielen Techniken zum Überwachen und Koordinieren des eigenen Lernens (sog. metakognitive Strategien) eine zentrale Rolle in der CTML, da mithilfe dieser die Zuteilung der begrenzten kognitiven Ressourcen gesteuert werden kann (Azevedo & Alevi, 2013; Graesser, Hacker & Dunlosky, 2009).

Die CTML orientiert sich an der konstruktivistischen Konzeption, dass Lernende selbst die Konstrukteure ihres Wissenserwerbs sind. Sie sind daher aktiv am Lernprozess beteiligt und keine passiven Konsumenten, denen ohne Aufwand und Anstrengung über den „Nürnberger Trichter“ reichhaltiges Wissen von Lehrenden eingebläut wird (Klauer & Leutner, 2012). Unter aktivem Lernen versteht Mayer (2009, 2014a) dabei die Anwendung derjenigen kognitiven Verarbeitungsprozesse, die zur Konstruktion eines kohärenten mentalen Modells führen. „A mental model (or knowledge structure) represents the key parts of the presented material and their relations“ (Mayer, 2014a, S. 50). Diese für die Konstruktion eines mentalen Modells notwendigen kognitiven Verarbeitungsprozesse umfassen im Einklang mit Wittrocks (1974, 1990) *Generative Theory of Learning* das Auswählen von relevanten Elementen aus dem Lernmaterial (*selecting*), die mentale Organisation der ausgewählten Elemente und ihrer Beziehung zueinander zu einem verbalen und einem piktorialen mentalen Modell im Arbeitsgedächtnis (*organizing*) sowie die Verknüpfung dieser Modelle miteinander und mit dem Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis (*integrating*).

Dass eine Notwendigkeit zur Selektion von Elementen besteht, hängt mit der beschränkten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zusammen. Da es nicht möglich ist, komplexes Lernmaterial als Ganzes zu erfassen und zu verarbeiten, müssen Lernende selbst auswählen, auf welche Elemente sie gerade ihre Aufmerksamkeit richten. Dieser Selektionsprozess der relevanten Elemente erfolgt jedoch nicht willkürlich, sondern wird von den Lernenden aktiv gesteuert: Sie entscheiden, welche Elemente für den Verstehensprozess am relevantesten sind.

Die ausgewählten Elemente werden innerhalb der beiden Verarbeitungssysteme im Arbeitsgedächtnis zu kohärenten Repräsentationen organisiert, indem Lernende Verbindungen zwischen den ausgewählten Elementen herstellen. Die beim Organisationsprozess gebildeten Wissensstrukturen nennt Mayer (2009, 2014a) verbales und piktoriales Modell (siehe Abbildung 1). Auch die Organisationsprozesse unterliegen den Kapazitätsgrenzen des Arbeitsgedächtnisses, sodass Lernende nicht alle möglichen Relationen zwischen den ausgewählten

Elementen herstellen können, sondern sich zunächst auf die einfachen Verbindungen konzentrieren müssen.

Schließlich müssen Lernende das verbale und das piktoriale Modell unter Einbezug des Vorwissens miteinander verknüpfen. In der daraus entstehenden integrierten Repräsentation sind die ausgewählten Elemente und ihre Beziehung im einen mentalen Modell dem jeweils anderen zugeordnet. Dieser Integrationsprozess erfolgt im visuellen und verbalen Verarbeitungssystem und erfordert daher die Zusammenarbeit beider Systeme. Dieser vielleicht wichtigste Schritt im Lernprozess ist kognitiv höchst anspruchsvoll, weshalb er eine effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden kognitiven Kapazität erfordert. Durch die Aktivierung des Vorwissens aus dem Langzeitgedächtnis kann der Integrationsprozess koordiniert und dadurch ressourcenschonender angewendet werden. Da komplexes Lernmaterial in Segmenten verarbeitet wird, treten während des Lernprozesses die kognitiven Prozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens häufiger auf. Diese müssen allerdings nicht in einer festen linearen Abfolge durchlaufen werden (Mayer, 2009, 2014a).

Der letzte Schritt des in der CTML dargestellten Verarbeitungsprozesses ist die dauerhafte Speicherung der gelernten Informationen. Dieser Prozess des Enkodierens erfordert den Transfer des integrierten mentalen Modells aus dem Arbeitsgedächtnis in das Langzeitgedächtnis (dieser Prozess ist nicht in Abbildung 1 dargestellt).

Metakognition spielt nach Mayer (2014a) im multimedialen Lernprozess eine besondere Rolle, da das metakognitive Bewusstsein der Lernenden die Ausführung der kognitiven Prozesse überwacht und steuert. „In short, effective multimedia learning includes helping learners become self-regulated learners – that is, learners who take responsibility for managing their cognitive processing during learning” (Mayer, 2014a, S. 56). Ebenso hat die Motivation der Lernenden einen Einfluss auf das Gelingen der Lernbemühungen. Die Lernmotivation spiegelt sich dabei in der Bereitschaft der Lernenden wider, die Prozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens in angemessener Weise umzusetzen und so sinnstiftende Lernprozesse anzustoßen. Beide Aspekte der Metakognition und Motivation sind allerdings bisher in der CTML unterrepräsentiert und nur rudimentär im Modell angedeutet (siehe Abbildung 1).

Zusammengefasst profitieren Lernende dann von multimedialen Lernmaterialien, wenn sie aus den Text- und Bildinformationen ein kohärentes mentales Modell erstellen können, ohne

sich dabei kognitiv zu überlasten. Aufbauend auf der CTML hat Mayer (2009) deshalb Gestaltungsprinzipien für multimediale Lernmaterialien formuliert, die für eine optimale kognitive Auslastung beim Lernen sorgen sollen⁵.

1.1.2 Das Integrated Model of Text and Picture Comprehension

Mit dem *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* (ITPC) präsentiert Schnotz (2002, 2014; siehe auch Schnotz und Bannert, 1999a, 1999b, 2003) einen weiteren theoretischen Rahmen zum multimedialen Lernen, welcher zwar Ähnlichkeiten mit Mayers (2009, 2014a) CTML aufweist, aber insbesondere die mentalen Repräsentationen anders betont. Das ITPC unterscheidet dabei zwischen deskriptiven und depiktiven Repräsentationsformen (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Generell sind deskriptive Repräsentationen durch Symbole gekennzeichnet, die keinerlei äußerliche Ähnlichkeit mit dem Objekt aufweisen, für das sie stehen – so besitzt z. B. das Wort „Vogel“ in seiner Wortform keinerlei ikonische Ähnlichkeit mit einem wirklichen Vogel. Weitere Beispiele für deskriptive Repräsentationen sind mathematische Ausdrücke, Texte oder physikalische Formeln. Im Gegensatz dazu bestehen depiktive Repräsentationen aus ikonischen Zeichen, welche mit dem Referenzobjekt eine wahrnehmbare Ähnlichkeit aufweisen. Beispiele für depiktive Repräsentationen sind z. B. Bilder, Zeichnungen, Karten, aber auch Graphen oder der Ausschlag eines Messwerkzeugs (Schnotz, 2014). Während die Stärke der deskriptiven Repräsentationen in der Vermittlung von abstrakten Sachverhalten liegt, können aus depiktiven Repräsentationen Informationen direkt abgelesen werden (Kosslyn, 1999; Schnotz, 2014). Diese Unterscheidung zwischen deskriptiven und depiktiven Repräsentationen kann laut Schnotz (2014) auch auf mentale Repräsentationen übertragen werden.

Setzen Lernende sich mit einem Text auseinander, formen sie drei verschiedene mentale Repräsentationen. Beim Lesen des Textes erfolgt die Konstruktion einer Textoberflächenrepräsentation, mit deren Hilfe die Informationen aus dem Text oberflächlich wiedergegeben werden können. Auf Grundlage dieser Repräsentation kann durch semantische Verarbeitung eine propositionale Repräsentation aufgebaut werden, welche die konzeptuellen Kernaussagen des Textes beinhaltet und Grundlage für die Konstruktion eines eher bildlichen mentalen Modells des beschriebenen Sachverhalts ist (z. B. Graesser, Millis & Zwaan, 1997; Kintsch, 1998; McNamara, 2007; van Dijk & Kintsch, 1983). Lernende, die mithilfe eines Bildes

⁵ Ausführlich werden die Gestaltungsprinzipien in Mayers (2014c) *Cambridge Handbook of Multimedia Learning* thematisiert und wissenschaftlich diskutiert.

lernen, erstellen bei der kognitiven Verarbeitung des Bildes zunächst ein Vorstellungsbild, auf dessen Grundlage ein abstraktes mentales Modell erzeugt wird, welches sich auf die wesentlichen Informationen beschränkt und zusätzlich mit Vorwissen angereichert ist (Kosslyn, 1999; Lowe, 1996; Schnotz, 2014). Da die Textoberflächenrepräsentation und die propositionale Repräsentation auf Grundlage von (Text-)Symbolen gebildet werden, sind sie den deskriptiven Repräsentationen zuzuordnen. Vorstellungsbild und mentales Modell sind laut Schnotz (2014) hingegen depiktive Repräsentationen, da angenommen wird, dass beide eine inhärente Struktur haben, die der Struktur des (im Text oder im Bild) beschriebenen Sachverhalts entspricht (Johnson-Laird, 1983; Kosslyn, 1999).

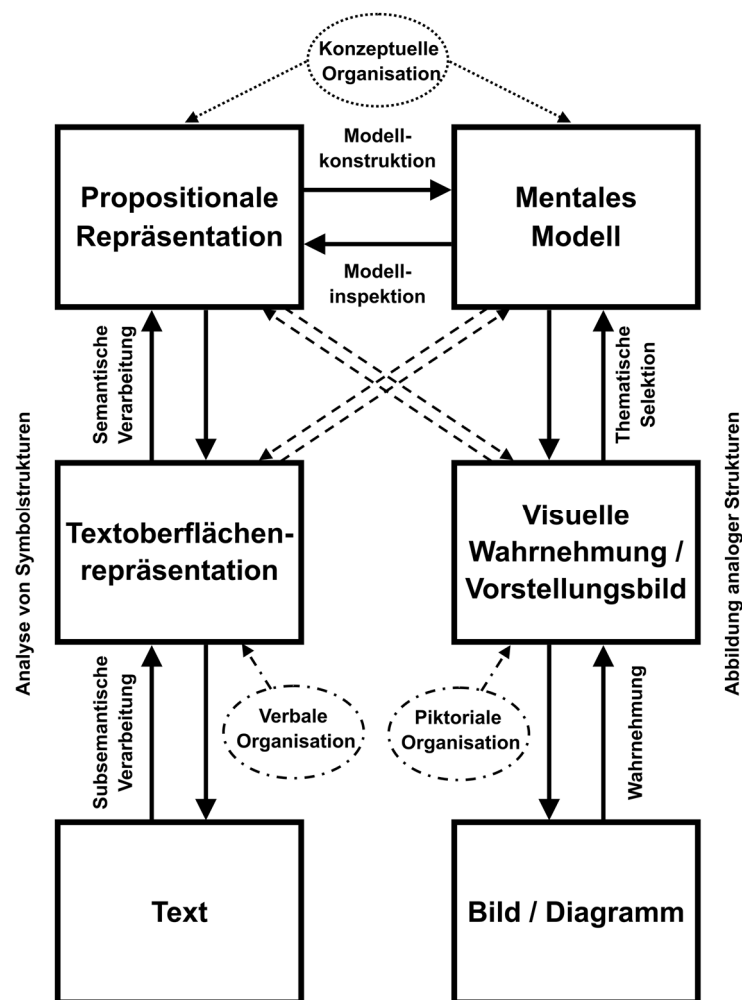


Abbildung 2: Theoretisches Grundgerüst zur Analyse des Text- und Bildverstehens von Schnotz und Bannert (2003); nach Schnotz (2014, S. 79; eigene Übersetzung).

Auf Grundlage dieser Unterscheidung zwischen deskriptiven und depiktiven Repräsentationen und im Einklang mit Paivios (1986, 2006) dualer Kodierungstheorie wird die kognitive Verarbeitung von Text- und Bildinformationen im ITPC in zwei unterschiedliche Pfade un-

terteilt. Im Gegensatz zur dualen Kodierungstheorie wird im ITPC angenommen, dass sowohl im System der Textverarbeitung als auch in dem der Bildverarbeitung multiple Repräsentationen gebildet werden. Informationen werden über die Sinnesorgane aufgenommen und über die sensorischen Kanäle an das Arbeitsgedächtnis weitergeleitet. Dabei ist zu beachten, dass es keine inhärente Beziehung zwischen sensorischen Modalitäten und Repräsentationsformaten gibt. Geschriebener Text kann demnach über die Augen aufgenommen werden, allerdings auch über das Erfühlen von Symbolen mit den Fingern (z. B. beim Lesen der Brailleschrift). Gesprochener Text kann über die Ohren aufgenommen werden, über das Ablesen von Lippenbewegungen oder das Ertasten des vibrierenden Kehlkopfs. Das Gleiche gilt auch für Bilder, die sowohl über die Augen aufgenommen werden können als auch über das Ertasten von dreidimensionalen Strukturen mit den Händen (z. B. Karten für Blinde). Auditive Bilder, welche Schnotz (2014) als „sound patterns imitating an original sound as, for example, the call of a bird“ (S. 80) definiert, werden hingegen über die Ohren in das kognitive System aufgenommen. Obwohl also mehrere sensorische Modalitäten am Text- und Bildverstehen beteiligt sein können, werden im ITPC nur die visuellen und auditiven Modalitäten betrachtet (Schnotz, 2014).

Gesprochener Text und auditive Bilder werden über den auditiven Kanal an das Arbeitsgedächtnis weitergeleitet, während geschriebener Text und Bilder über den visuellen Kanal in das Arbeitsgedächtnis gelangen. Beide Kanäle sind in ihrer Übertragungs- und Verarbeitungskapazität beschränkt. Die weitere semantische Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis findet dann im deskriptiven bzw. depiktiven Subsystem statt (siehe Abbildung 3). Die Informationsverarbeitung im deskriptiven Pfad des Modells beinhaltet die (subsemantische und semantische) Analyse von Symbolstrukturen, die zur Selektion relevanter Textmerkmale und zur Organisation dieser in eine propositionale Repräsentation führt. Unter Einbezug des Vorwissens aus dem Langzeitgedächtnis und vorhandener depiktiver Repräsentationen wird schließlich ein mentales Modell konstruiert. Bei der kognitiven Verarbeitung des Bildes wird zunächst im depiktiven Informationsverarbeitungspfad über die Wahrnehmung ein Vorstellungsbild erzeugt. Die Selektion und Organisation relevanter Bildinformationen führt zur Konstruktion des mentalen Modells, welches seinerseits mit themenbezogenem Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis und relevanten Informationen, welche die propositionale Repräsentation eines dazugehörigen Textes liefert, angereichert wird.

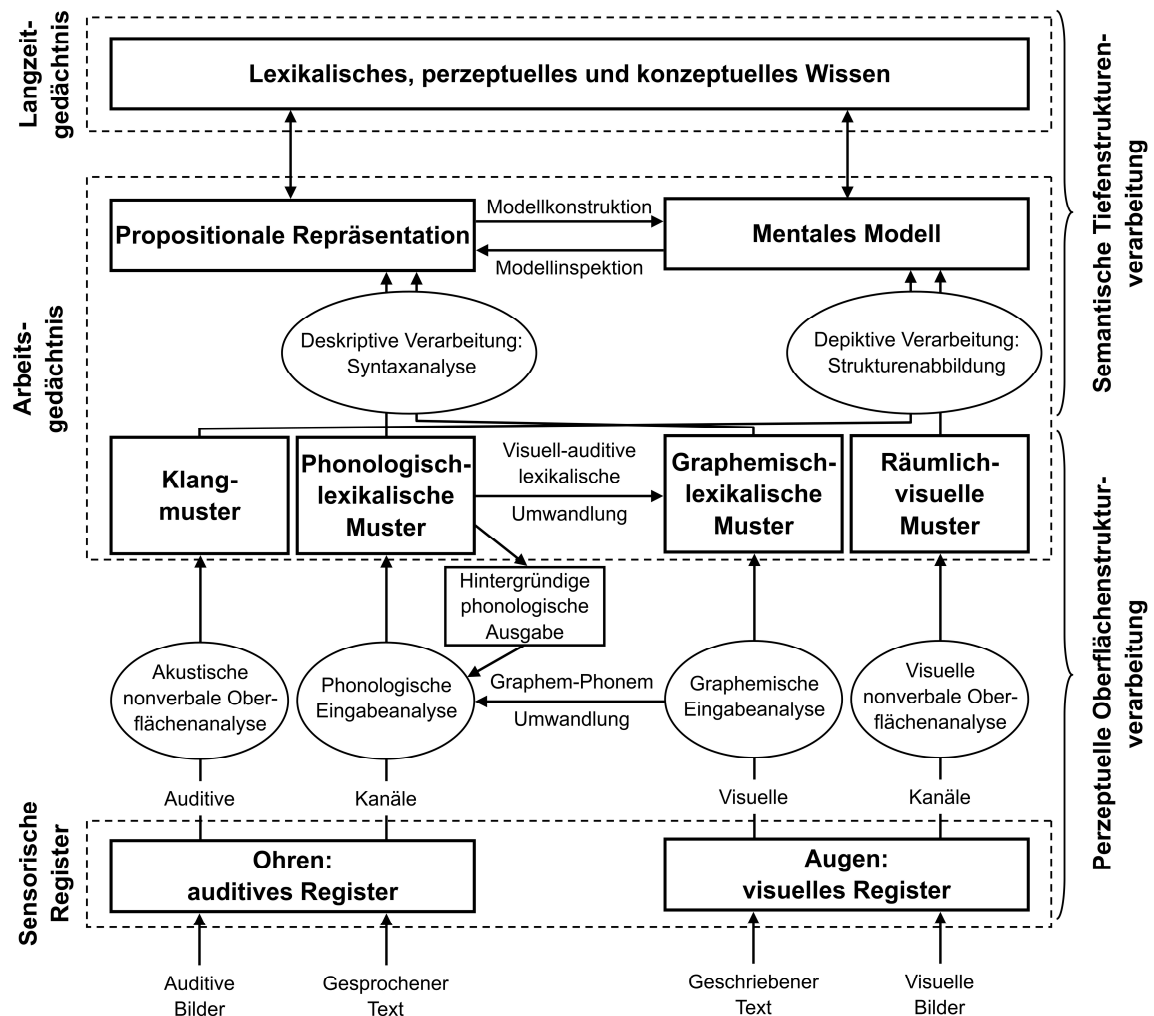


Abbildung 3: Das Integrated Model of Text and Picture Comprehension (Schnotz, 2014, S. 83; eigene Übersetzung).

Während der kognitiven Informationsverarbeitung interagieren das deskriptive und das depiktive Subsystem miteinander (siehe Abbildung 3). Informationen, die zuerst im deskriptiven Subsystem verarbeitet wurden, werden anschließend im depiktiven Subsystem verarbeitet – und umgekehrt. Dies führt dazu, dass „eine permanente Interaktion zwischen der propositionalen Repräsentation eines Sachverhaltes und der Repräsentation desselben Sachverhaltes in einem mentalen Modell statt[findet]“ (Klauer & Leutner, 2012, S. 116). Diese Interaktion erlaubt eine Inspektion des mentalen Modells, dessen Ergebnis als neue Information der propositionalen Repräsentation hinzugefügt werden kann, welches wiederum die Revision des mentalen Modells anstößt. Während also Mayer (2009, 2014a) in der CTML annimmt, dass Lernende ein separates verbales und piktoriales Modell konstruieren und diese in einem letzten Schritt erst integrieren, geht Schnotz (2014) im ITPC davon aus, dass Lernende eine gemeinsame Repräsentation von Text und Bild erstellen, in welcher die propositionale Repräsentation und das mentale Modell miteinander interagieren. Demnach

sind Text- und Bildverstehen aktive Prozesse der Kohärenzbildung: „In comprehension, individuals engage in building coherent knowledge structures from the available external verbal and pictorial information and from their prior knowledge” (Schnotz, 2014, S. 84).

1.1.3 Wirksamkeit des Lernens mit Text und vorgegebenen Bildern

Das von Mayer (2014a) formulierte *Multimedia-Prinzip* – „people learn more deeply from words and pictures than from words alone” (S. 43) – konnte bisher in zahlreichen empirischen Studien nachgewiesen werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob papierbasierte Lernmaterialien zum Einsatz kommen (z. B. Mayer, 1989; Mayer & Gallini, 1990; Mayer & Anderson, 1991, 1992; Moreno & Mayer, 1999; für einen Überblick siehe auch Carney & Levin, 2002; Levie & Lentz, 1982; Mayer, 2009) oder computerbasierte Lernumgebungen (z. B. Brünken, Steinbacher, Schnotz & Leutner, 2001; Butcher, 2006; Cuevas, Fiore & Oser, 2002; Eitel, Scheiter, Schüler, Nyström & Holmqvist, 2013; Eitel, Scheiter & Schüler, 2013; Eitel, 2016; Höffler & Leutner, 2007; Höffler, 2007; Kühl, Stebner, Navratil, Fehring & Münzer, 2017; Mayer & Moreno, 2002; Ögren, Nyström & Jarodzka, 2017; Plass, Chun, Mayer & Leutner, 1998; Schmidt-Weigand, 2006). Solange eine sinnstiftende kognitive Verarbeitung (*generative processing*) multimedialer Lerninhalte stattfindet, tritt der *Multimedia-Effekt* unabhängig vom eingesetzten Medium auf (sog. *method-affects-learning hypothesis*; Mayer, 2003; Moreno, 2006; Schmeck, 2010).

Die Lernwirksamkeit einer multimedialen Lernumgebung hängt demnach in entscheidendem Maße davon ab, ob die dem Text beigefügten Bilder die Konstruktion eines mentalen Modells des im Text beschriebenen Sachverhalts unterstützen oder – im Extremfall – sogar behindern (Klauer & Leutner, 2012; Schnotz & Bannert, 2003). In einer Studie von Herrlinger, Höffler, Opfermann und Leutner (2017) wurde beispielsweise untersucht, ob das Hinzufügen von Bildern zu einem biologischen Sachtext das Lernen von Kindern in der vierten Klasse unterstützt und ob die Textmodalität (geschrieben oder gesprochen) eine Rolle spielt. 137 Schülerinnen und Schüler aus verschiedenen vierten Grundschulklassen lernten an zwei aufeinander folgenden Tagen in vier verschiedenen Gruppen die Funktionsweise des Blutkreislaufs anhand zweier Sachtexte (405 und 440 Wörter). Die erste Gruppe erhielt nur einen Text und sollte diesen lesen, die zweite Gruppe erhielt zusätzlich zu dem Text vorgegebene Bilder, der dritten Gruppe wurde der Text vorgelesen und zusätzlich ein Arbeitsblatt mit den vorgegebenen Bildern ausgeteilt und der vierten Gruppen wurde der Text nur vorgelesen. Die Ergebnisse zeigen, dass die zusätzlichen Bilder zwar den Lernerfolg verbesserten, aber

nur dann, wenn der Text vorgelesen wurde. Die Gruppen, die keine Bilder erhielten, unterschieden sich im Lernerfolg nur unwesentlich. Weiterhin zeigte sich, dass in der Gruppe mit geschriebenem Text das Hinzufügen von Bildern den Lernerfolg sogar reduziert hat. Herrlinger et al. (2017) schlossen daraus, dass das Hinzufügen von Bildern zu geschriebenem Text die Aufmerksamkeit der Grundschüler vom Text weg zum Bild gelenkt habe und dass das Betrachten der Bilder zusätzlich zum selbstständigen Lesen die kognitiven Fähigkeiten – und insbesondere den visuellen Kanal – der Lernenden überfordert haben könnte. In diesem Fall seien Text und Bilder nicht in ein kohärentes mentales Modell integriert worden und demnach habe kein effektives Lernen stattgefunden. Dieser für den Lernerfolg nachteilige *shift-of-attention effect* (Brünken & Leutner, 2001) von Bildern kann dadurch vermieden werden, dass die Lernenden nur die Bilder auf einem Arbeitsblatt erhalten und die Informationen aus dem Text vorgelesen bekommen. Die Entlastung des Arbeitsgedächtnis über die Verteilung der Informationen auf den visuellen und auditiven Kanal wird *Modalitäts-Prinzip* genannt und ist eines der Gestaltungsprinzipien, die das Lernen wesentlich steigern können (einen Überblick zum *Modalitäts-Prinzip* bieten Low & Sweller, 2014; zur Kritik am *Modalitäts-Prinzip* siehe Rummer, Schweppe, Scheiter & Gerjets, 2008; Rummer, Schweppe, Fürstenberg, Seufert & Brünken, 2010).

Weiterhin hängt der Lernerfolg multimedialer Lerninhalte davon ab, ob die einzelnen Elemente und Komponenten der verwendeten Texte und Abbildungen richtig verstanden und in einen Zusammenhang gebracht werden können⁶. Der Einsatz multimedialen Lernmaterials garantiert nämlich noch nicht, dass Lernende sich mit den verschiedenen Repräsentationen auch in adäquater Weise auseinandersetzen. Häufig werden Bilder nur flüchtig betrachtet, sodass Bildinformationen nur oberflächlich verarbeitet werden und nicht das volle Potenzial aus der Text-Bild-Kombination erschlossen wird (Brandstetter et al., 2017; Brandstetter-Korinath, 2017; Cheng & Gilbert, 2014; Chittleborough & Treagust, 2008; Cook et al., 2008; Hannus & Hyönä, 1999; Kragten et al., 2015; Seufert, 2003). Weiterhin fehlt Lernenden häufig das Wissen, wie Bildinformationen richtig zu lesen sind, sodass eine äquivalente Informationsgewinnung aus Texten und Bildern erfolgen kann (Brandstetter et al., 2017). Vor allem Lernende mit geringem Vorwissen können deshalb nicht immer von multimedialen Lerninhalten profitieren, da besonders bei komplexen Sachtexten das domänenspezifische

⁶ Ainsworth (2014) bietet eine Übersicht über einige Studien, die multiple Repräsentationen eingesetzt haben. Weiterhin zeigt sie Einflussfaktoren auf, welche die Effektivität von multiplen Repräsentationen beeinflussen können.

Vorwissen fehlt, um die relevanten Informationen aus Text und Bild aufzunehmen. So werden zwar eine verbale und eine piktoriale Repräsentation konstruiert, jedoch wird häufig der Zusammenhang beider Repräsentationen miteinander nicht erkannt, sodass sowohl Interaktion als auch Integration der beiden Repräsentationen nicht – oder nur unzureichend – stattfindet und entsprechend nur ein oberflächliches mentales Modell gebildet werden kann (z. B. Ainsworth, Wood & Bibby, 1998; Bodemer, Ploetzner, Feuerlein & Spada, 2004; Seufert & Brünken, 2006).

Multimediales Lernmaterial bietet sich besonders in den Bereichen an, in denen räumlich-visuelle Informationen eine große Rolle spielen, wie z. B. in der Biologie (z. B. Schmeck, Mayer, Opfermann, Pfeiffer & Leutner, 2014; Stalbovs, Scheiter & Gerjets, 2015), der Physik (z. B. Mayer, 1989; Mayer & Gallini, 1990; Opfermann, Schmeck & Fischer, 2017), der Mathematik (z. B. Ainsworth, Bibby & Wood, 2002; Rellensmann, Schukajlow & Leopold, 2017) oder der Geographie (z. B. Harp & Mayer, 1997). Dementsprechend wurde multimediales Lernen häufig im naturwissenschaftlichen Kontext untersucht, da dort vermehrt depiktive grafische Darstellungen verwendet werden können und Repräsentationen sich gut von bereits bestehenden ikonischen Zeichensystemen herleiten lassen. Um den Grad der Generalisierbarkeit von Mayers (2009, 2014a) CTML zu prüfen, haben Westelinck, Valcke, Craene und Kirschner (2005) multimediales Lernen im Kontext der Sozialwissenschaften untersucht. Ihre Forschungshypothese stützt sich auf die Annahme, dass sich im Vergleich zu den Naturwissenschaften die Art und Weise unterscheidet, in der sich in den Sozialwissenschaften adäquate depiktive Repräsentationen entwickeln lassen. Dazu wurden sechs Experimente mit 190 Erstsemestern durchgeführt, die in den jeweiligen Experimenten mit verschiedenen komplexen Texten zur Thematik der Lernstiltheorien konfrontiert wurden. Zur Untersuchung des *Multimedia-Prinzips* erhielt in jedem Experiment eine Gruppe nur den Text, während eine zweite Gruppe zusätzlich zum Text vorgegebene Bilder erhielt. Die Bilder wurden nach Mayers (2001) Gestaltungsprinzipien für multimediale Lernumgebungen von den Autoren und 20 Psychologiestudierenden entwickelt. Die Ergebnisse zeigen, dass in fünf der sechs Experimente die Gruppe ohne Bilder in Lernerfolgstests besser abschnitt, als die Gruppe, die zum Text vorgegebene Bilder erhielt. Weiterhin konnte keine geringere mentale Belastung durch das Hinzufügen von Bildern festgestellt werden. Westelinck et al. (2005) schlossen aus den Ergebnissen, dass für Lerninhalte, die sich nur bedingt in graphischen Darstellung wiedergeben lassen bzw. nicht auf einem bereits bekannten ikonischen Zei-

chensystem aufbauen, andere als die Mayer'schen (2009, 2014a) Gestaltungsprinzipien gelten müssen. Die Autoren schlagen vor, Lernende selbst geeignete Darstellungen entwickeln zu lassen, die ihnen beim Lernen helfen.

Der Einsatz von multimedialen Lernmaterialien ist also unter anderem besonders dann erfolgreich, wenn sich die Lerninhalte auch in geeigneter Weise in Bildern wiedergeben lassen und diese nicht vom Text ablenken, sondern zur sinnstiftenden kognitiven Verarbeitung der Informationen beitragen, ohne Lernende kognitiv zu überlasten. Lernende müssen also darauf vertrauen, dass die dem Lernmaterial beigelegten Bilder diesen Kriterien entsprechen, um ihre Lernprozesse zu optimieren. Für den Biologieunterricht konnte Brandstetter-Korinth (2017) zeigen, dass in Biologielehrbüchern neben dekorativen Fotografien häufig komplexe und detailreiche Abbildungen verwendet werden, deren enorme Informationsdichte viele Schülerinnen und Schüler überfordert. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass den Schülerinnen und Schülern häufig geeignete Strategien fehlen, um die zahlreichen Darstellungsdetails während des Bildverstehens zu entschlüsseln und damit einen Sinn aus den Bildern zu entnehmen. Einen alternativen Zugang im Umgang mit Bildern bietet die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens, welche sinnstiftende kognitive Verarbeitung fördert und bei welcher Lernende selbst für die Erstellung geeigneter Abbildungen zu einem Text verantwortlich sind.

1.2 Die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens

Es existieren viele verschiedene Ansätze von Lernstrategiekonzeptionen (eine Übersicht findet sich bei Leopold, 2009), was eine eindeutige Definition des Begriffs *Lernstrategie* erschwert. Weinstein und Mayer (1986) umschreiben Lernstrategien als „behaviours and thoughts that a learner engages in during learning and that are intended to influence the learner's encoding process“ (S. 315). Ähnlich beschreiben Fiorella und Mayer (2015) Lernstrategien allgemein als „activities the learner engages in during learning that are intended to improve learning“ (S. i). Etwas genauer definieren Fiorella und Mayer (2015) hingegen eine generative Lernstrategie, welche eine Aktivität darstellt, die von Lernenden selbst während des Lernens mit dem Ziel initiiert wird, Sinn aus einem präsentierten Lernmaterial zu entnehmen. Generative Lernstrategien fördern dabei tiefenorientierte kognitive Verarbeitungsprozesse, was zu einem tieferen Verständnis der zu lernenden Sachverhalte führt (Fiorella & Mayer, 2015; Mayer, 2009, 2014a). Diese Definition liegt auch dieser Arbeit zugrunde.

Die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens ist eine selbstregulierte generative Lernstrategie, bei der Lernende während des Lesens eines Textes Zeichnungen erstellen, welche die zentralen Sachverhalte des Textes abbilden (Leutner & Opfermann, 2013; Leutner & Schmeck, 2014). Eine Zeichnung zu erstellen heißt in diesem Zusammenhang, dass verbal kodierte räumliche Informationen über Gegenstände oder Sachverhalte aus einem Text in eine externe Visualisierung überführt werden. Bei dieser Art von Zeichnung handelt es sich also vor allem um sogenannte repräsentationale Bilder, welche räumliche Beziehungen funktionaler Elemente zueinander bildlich darstellen (Carney & Levin, 2002). Als repräsentationale Bilder definiert Alesandrini (1984) solche, „that share a physical resemblance with the thing or concept that the picture stands for“ (S. 63). Für das Erstellen repräsentationaler Zeichnungen bedeutet das, dass diese eine physische Ähnlichkeit mit den Objekten, die sie darstellen sollen, aufweisen (van Meter & Garner, 2005). Die in dieser Arbeit thematisierten repräsentationalen Zeichnungen sind von nicht-repräsentationalen Zeichnungen, wie z. B. Diagrammen, Graphen oder Mind-Maps, abzugrenzen, da angenommen wird, dass diesen andere kognitive Prozesse zugrunde liegen (Ainsworth, 1999; Grossen & Carnine, 1990; Schwonke, Berthold & Renkl, 2009; van Meter & Garner, 2005). Gemäß van Meter und Garner (2005) sind daher sinnstiftende Zeichnungen definiert als „pictorial representations (a) that are intentionally constructed to meet a learning goal, (b) that are meant to depict represented objects accurately and, (c) for which the learner is primarily responsible for construction and / or final appearance“ (S. 290).

Den theoretischen Hintergrund der Strategie des sinnstiftenden Zeichnens bildet die *Generative Theory of Drawing Construction* (van Meter & Garner, 2005) bzw. deren Erweiterung, das *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013), welche im Folgenden näher vorgestellt werden.

1.2.1 Die Generative Theory of Drawing Construction

Während Modelle wie die CTML (Mayer, 2009, 2014a) oder das ITPC (Schnotz, 2014) die zugrundeliegenden zentralen Informationsverarbeitungsprozesse des Lernens mit Texten und vorgegebenen Abbildungen aufgreifen, befasst sich die *Generative Theory of Drawing Construction* (GTDC; van Meter & Garner, 2005) mit den zugrundeliegenden Informationsverarbeitungsprozessen, wenn Lernende selbst eine Zeichnung zu einem Text erstellen. Die GTDC basiert auf dem Vorläufermodell der CTML, der *Generative Theory of Textbook Design* (Mayer, Steinhoff, Bower & Mars, 1995), welche im Einklang mit Wittrocks (1974,

1990) Einsichten zum generativen Lernen und Paivios (1986, 2006) dualer Kodierungstheorie die Konstruktion eines mentalen Modells durch die drei kognitiven Prozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens beschreibt.

Demnach beginnt der Informationsverarbeitungsprozess, indem Lernende beim Lesen eines Textes relevante Informationen auswählen („Wörter selektieren“; siehe Abbildung 4). Die ausgewählten Elemente werden dann im Arbeitsgedächtnis zu einer kohärenten verbalen Repräsentation des Textes organisiert. Auf Grundlage dieser verbalen Repräsentation wird schließlich unter Einbezug des Vorwissens eine interne nonverbale Repräsentation im Arbeitsgedächtnis erstellt, welches für die Erstellung eines externalen Bildes notwendig ist. In der nonverbalen Repräsentation werden die im Text beschriebenen Elemente in piktoriale Elementen übersetzt und ihre Relation zueinander bestimmt. Bereits bestehendes Vorwissen kann diesen Übersetzungsprozess unterstützen: Wenn beispielsweise im Text ein Element als konkav beschrieben wird, können Lernende bereits bestehende referentielle Verknüpfungen verwenden, um eine bildliche Übersetzung des Wortes „konkav“ abzurufen. Fehlt eine solche Verknüpfung, müssen Lernende ihre nonverbale Repräsentation auf Grundlage einer unvollständigen verbalen Repräsentation konstruieren (van Meter & Garner, 2005; van Meter & Firetto, 2013). In diesem Zusammenhang weisen van Meter und Garner (2005) darauf hin, „that a learner’s prior knowledge acts as a critical, and as yet unexplored, support when using the learner-generated drawing strategy. Further research is needed to consider exactly how this prior knowledge may function as a support when learners draw“ (S. 318).

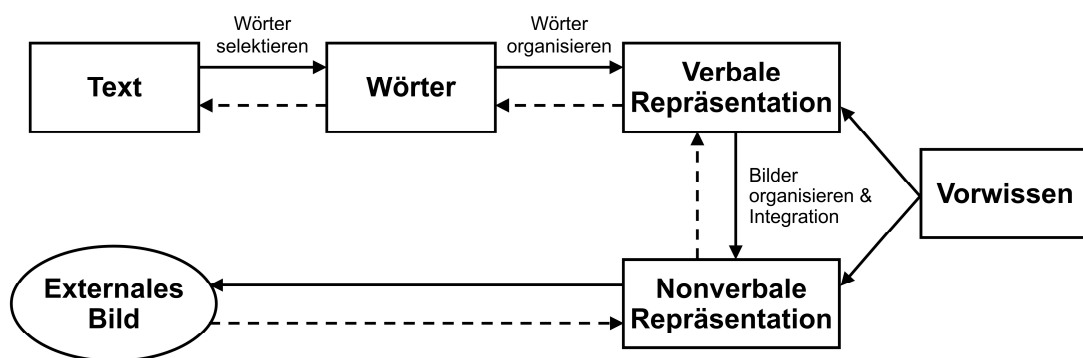


Abbildung 4: Die Generative Theory of Drawing Construction (van Meter & Garner, 2005); in Anlehnung an die Darstellung von Schmeck (2010, S. 29).

Diese Integration der verbalen und nonverbalen Repräsentation mit dem vorhandenen Vorwissen nennen Mayer (2009, 2014a; siehe auch Kapitel 1.1.1) und Schnotz (2014; siehe auch Kapitel 1.1.2) die Konstruktion eines mentalen Modells, welches als hauptverantwortlich für tiefergehendes Lernen und daraus resultierenden erhöhten Lernerfolg angesehen wird. Im

Gegensatz zur CTML oder der ITPC kann gemäß der GTDC jedoch der Organisationsprozess nicht separat vom Integrationsprozess betrachtet werden. Da die verbale Repräsentation die Grundlage für die nonverbale Repräsentation bildet, besteht eine zwangsläufige Verknüpfung zwischen diesen Repräsentationen – d. h., um eine Zeichnung zu erstellen, ist eine Integration dieser beiden Repräsentationen unumgänglich. Diese „erzwungene Integration“ der verbalen und der nonverbalen Repräsentation, die beim Zeichnen automatisch stattfindet, sehen van Meter und Garner (2005) als große Stärke des sinnstiftenden Zeichnens an, da das Zeichnen dadurch eher zur Konstruktion eines mentalen Modells führe als das bloße Betrachten von Text- und vorgegebenem Bildmaterial.

Weiterhin findet – im Gegensatz zur Strategie des sinnstiftenden Zeichnens – bei der Bereitstellung von Text und vorgegebenem Bildmaterial nicht zwangsläufig eine Integration der internen verbalen und nonverbalen Repräsentationen statt (z. B. Bodemer et al., 2004; Seufert & Brünken, 2006). Zwar bilden Lernende interne Repräsentationen beim Lernen, aber insbesondere Lernende mit wenig Vorwissen erkennen häufig den Zusammenhang zwischen beiden nicht und stellen so nicht die notwendigen Verbindungen zwischen den Repräsentationen her, die für die Konstruktion eines kohärenten mentalen Modells notwendig sind (z. B. Ainsworth et al., 1998; Ainsworth et al., 2002; Kozma & Russell, 1997; Seufert, 2003).

Die Prozesse, die Lernende von der Auswahl geeigneter Elemente aus dem Text bis hin zur Anfertigung einer Zeichnung ausführen, verlaufen allerdings nicht linear, da der Prozess der Bildgenerierung die dem Wissenserwerb zugrundeliegenden kognitiven Prozesse steuert. Das Erstellen einer Zeichnung beginnt zwar mit dem Auswählen und Organisieren verbaler Elemente, jedoch erhalten Lernende durch den Zeichenprozess eine direkte Rückmeldung darüber, ob ihnen noch Elemente für das Anfertigen der Zeichnung fehlen, sodass sie bei der Anwendung der Zeichenstrategie zahlreiche Rekurse durchlaufen. Diese angestoßenen Prozesse metakognitiver Selbstüberwachung und Selbstregulation sind schließlich dafür verantwortlich, dass Lernende ihre internen Repräsentationen überprüfen und gegebenenfalls selbstständig den Text erneut hinzuziehen, um neue Elemente auszuwählen und die internen Repräsentationen zu überarbeiten (van Meter, 2001; van Meter & Garner, 2005). Studien von van Meter (2001) und Leopold und Leutner (2015) liefern empirische Belege für diese Annahme. In der Studie von van Meter (2001) wurden Schülerinnen und Schüler auf drei verschiedene Zeichenbedingungen mit unterschiedlichen instruktionalen Hilfen und eine

Kontrollgruppe aufgeteilt, welche nur den Text las. Alle Gruppen wurden instruiert laut auszusprechen, was sie beim Lernen denken („lautes Denken“⁷). Die Auswertung der Protokolle zum lauten Denken zeigt, dass alle Gruppen mit Zeicheninstruktion signifikant mehr Selbstüberwachungsprozesse ausführten als die Kontrollgruppe (van Meter, 2001).

Leopold und Leutner (2015) haben in einer Studie untersucht, ob Trainings mit Fokus auf Selbstregulation die Anwendung von Lernstrategien im Hinblick auf das Textverständnis verbessern können. In einem der Experimente erhielten Schülerinnen und Schüler neben einem Text und einer Zeicheninstruktion (1) ein Training zur Ausführung der Zeichenstrategie, (2) ein Training zur Ausführung der Zeichenstrategie und zusätzlich noch ein Training zur Selbstregulation oder (3) gar kein Training. Die Auswertung der Lernerfolgstests ergab, dass beide Gruppen mit Trainings die Kontrollgruppe ohne Training im Lernerfolg übertrafen, ein zusätzliches Selbstregulationstraining zum Strategietraining jedoch keinen weiteren Einfluss auf den Lernerfolg hatte. Leopold und Leutner (2015) schlossen aus den Ergebnissen, dass die Zeichenstrategie ein implizites hohes metakognitives Potenzial besitzt und Lernende daher nicht von zusätzlichen spezifischen Trainings in metakognitiver Kontrolle und Selbstregulation profitieren.

1.2.2 Das Cognitive Model of Drawing Construction

Um das metakognitive Potenzial der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens näher zu beschreiben, haben van Meter und Firetto (2013) das *Cognitive Model of Drawing Construction* (CMDC) entwickelt, welches eine überarbeitete Version der ursprünglichen GTDC (van Meter & Garner, 2005) darstellt. Das CMDC übernimmt dabei die Grundprinzipien der GTDC: „For the most part, these processes are consistent with the original GTDC; namely, the selection and organization of descriptive elements and the forced integration of the descriptive and depictive representations” (van Meter & Firetto, 2013, S. 255–256). Van Meter und Firetto (2013) verstehen die Prozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens im CMDC aber im Sinne eines durch Selbstüberwachung und Selbstregulation gesteuerten Kreislaufs, weshalb nun auch Prinzipien aus Winnes und Perrys (1998; Winne & Perry, 2000) Modell zum selbstregulierten Lernen in die Modellbildung zum sinnstiftenden Zeichnen mit einfließen. Weiterhin wurde im CMDC die Darstellung der internen verbalen und

⁷ Die Methode des „lauten Denkens“ wird vornehmlich zur Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen angewendet. Dabei werden die Versuchspersonen darum gebeten, beim Lernen ihre Gedanken laut auszusprechen. Diese werden per Tonband aufgezeichnet, transkribiert und anschließend im Hinblick auf theoretische Konstrukte kategoriengeleitet analysiert und ausgewertet. Eine Übersicht zur Methode des lauten Denkens liefert Sandmann (2014).

nonverbalen Repräsentation überdacht, die in der GTDC getrennt voneinander betrachtet wurden. Um ein besseres Verständnis der Einflüsse der Repräsentationen untereinander und deren Zusammenwirken als ein dynamisches System zu erlangen, wurden Grundprinzipien aus Schnotz' *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* (2005, 2014; siehe auch Schnotz & Bannert, 2003; Kapitel 1.1.2) adaptiert und die Darstellung des CMDC entsprechend angepasst (siehe Abbildung 5).

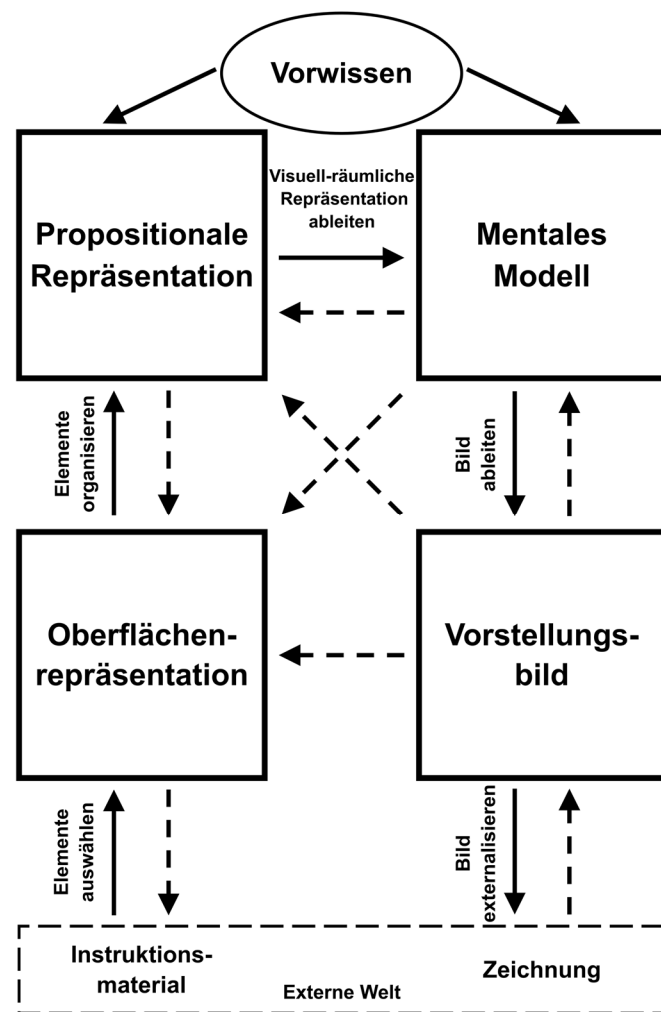


Abbildung 5: Das Cognitive Model of Drawing Construction (van Meter & Firetto, 2013, S. 256; eigene Übersetzung).

Das Modell nimmt an, dass Lernende durch die Instruktion zum Zeichnen zentrale Elemente aus dem Text auswählen und mit diesen ausgewählten sprachlichen Merkmalen im Arbeitsgedächtnis eine mentale Oberflächenrepräsentation erstellen. Die Organisation dieser sprachlichen Merkmale führt zur Konstruktion einer propositionalen Repräsentation, welche strukturelle Elemente beinhaltet und bestimmt, wie diese Strukturen aussehen und wie sie zusammenhängen. Auf Grundlage der propositionalen Repräsentation wird schließlich durch Integration mit dem Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis ein kohärentes mentales

Modell abgeleitet. Übereinstimmend mit dem ITPC nehmen van Meter und Firetto (2013) an, dass das mentale Modell ein depiktives Modell bestehend aus räumlich-visuellen Informationen ist, welches hauptverantwortlich für den Lerneffekt des sinnstiftenden Zeichnens ist. Wie bei der GTDC beeinflusst das Vorwissen im CMDC sowohl die propositionale Repräsentation als auch die Konstruktion des mentalen Modells. Fehlen im Text räumlich-visuelle Beschreibungen der Kernelemente, müssen Lernende auf ihr Vorwissen zurückgreifen, um diese in eine visuelle Form zu übersetzen.

Schließlich führt die Übersetzung des mentalen Modells in ein weniger abstraktes Vorstellungsbild dazu, dass das Gedachte als Zeichnung zu Papier gebracht werden kann. Die hier beschriebenen mentalen Prozesse werden im CMDC als vom Lernenden selbst regulierte Lernprozesse verstanden. Das Erstellen einer Zeichnung wird daher auch im CDMC nicht als linearer Prozess, sondern eher im Sinne des Durchlaufens einer rekursiven Feedback-Schleife aufgefasst. Die daraus resultierenden Prozesse der metakognitiven Selbstkontrolle werden im CMDC in Anlehnung an Winnes und Hadwins (1998; siehe auch Winne & Perry, 2000) Prozessmodell der Selbstregulation mittels eines dreiphasigen Selbstregulationskreislaufs beschrieben. Dieser besteht aus (1) dem Setzen von Zeichnungsstandards, (2) der Anwendung von (strategischen) Prozessen und (3) der Überwachung des Lernfortschritts.

Erhalten Lernende die Instruktion zur Anfertigung einer Zeichnung zu einem Text, durchlaufen sie die erste Phase des Kreislaufs, indem sie sich überlegen, welche Details die Zeichnung enthalten soll oder wie die im Text beschriebenen Zusammenhänge zeichnerisch dargestellt werden können. Diese Standards dienen im weiteren Verlauf des Zeichenprozesses als Anker für die metakognitiven Kontrollprozesse. Resultierend aus dieser ersten Phase nehmen van Meter und Firetto (2013) an, dass zum einen die Qualität dieser Standards die Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens beeinflusst und dass zum anderen durch das Setzen von Standards die Aufmerksamkeit der Lernenden auf zentrale Elemente des Textes und ihre (räumlichen) Zusammenhänge gelenkt wird.

Die zweite Phase bezieht sich auf die Anwendung der kognitiven Prozesse des Selektierens und Organisierens, die für die Erstellung der internen Repräsentationen notwendig sind. So müssen Lernende zunächst die wesentlichen Elemente aus dem Text auswählen, um eine erste mentale Oberflächenrepräsentation des Gelesenen zu bilden. In einem zweiten Schritt werden diese Elemente zu einer propositionalen Repräsentation organisiert, welches die Basis für das mentale Modell und somit für die Zeichnung liefert. Zu diesen Prozessen gehören auch Transformationen von Beschreibungen aus dem Text in visuelle Darstellungen und wie

diese in einer Zeichnung kombiniert werden müssen. Dementsprechend ist die Qualität dieser Prozesse entscheidend für die Effektivität des sinnstiftenden Zeichnens und somit für das Textverständnis. Laut van Meter und Firetto (2013) regt die Instruktion zur Erstellung einer Zeichnung zu einem Text Lernende automatisch zur Nutzung weiterer Lernstrategien (z. B. Textmarkierung, Vorwissensaktivierung, Generieren von Fragen) an, welche bei der Bildung der propositionalen Repräsentation helfen und somit die Konstruktion des mentalen Modells und den Zeichenprozess unterstützen.

Gemäß dem CMDC erreichen Lernende die dritte Phase des Selbstregulationskreislaufs, wenn sie ihre sich in der Entstehung befindende Zeichnung mit den in der ersten Phase festgelegten Standards vergleichen (siehe Abbildung 5). Sofern der momentane Stand der Zeichnung diesen Standards genügt, kann die Zeichenaufgabe fortgesetzt werden. Besteht aber ein Widerspruch zwischen dem Stand der Zeichnung und den Standards, müssen sich Lernende noch einmal mit der propositionalen Repräsentation oder dem Textmaterial selbst befassen (siehe auch Nelson & Narens, 1990). Diese automatisch angeregte Selbstüberwachung und die daraus resultierende Regulation stellen laut van Meter und Firetto (2013) eine besondere Stärke der Zeichenstrategie dar. Die Erstellung einer Zeichnung ist nahezu unmöglich, wenn Lernende nicht zumindest die wesentlichen Elemente und Zusammenhänge eines Textes erschlossen haben. In Anlehnung an Reason (1990) sehen van Meter und Firetto (2013) das Anfertigen einer Zeichnung „as a forcing function in which forward movement is blocked if some portion of the drawing cannot be externalized“ (S. 259). Wenn Lernende beispielsweise Unstimmigkeiten in ihrer Zeichnung feststellen (etwa, wenn zwei Elemente sich nicht zusammenfügen lassen), erhalten sie dadurch eine Rückmeldung darüber, dass der Text noch nicht vollends verstanden worden ist. Eine Zeichnung kann erst dann korrekt zu Papier gebracht werden, wenn das mentale Modell überarbeitet worden ist, weshalb Lernende gezwungen sind Textpassagen erneut zu lesen, die erforderlichen bisher fehlenden Informationen aus dem Text auszuwählen, zu organisieren und diese mit ihrer Zeichnung zu verknüpfen. In Übereinstimmung mit dem ITPC nimmt das CMDC an, dass das mentale Modell nun sowohl vom Vorstellungsbild als auch von der propositionalen Repräsentation Informationen erhält. Deshalb, so schließen van Meter und Firetto (2013), ist es beim Anfertigen einer Zeichnung schwieriger, Unwissen zu „kaschieren“, als z. B. beim Zusammenfassen des Textes, da beim Fehlen von zentralen Informationen die Zeichnung nicht gelingen kann (siehe auch van Meter & Riley, 1999). Resultierend aus der dritten Phase nehmen van Meter und Firetto (2013) an, dass Lernende, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, häufiger Prozesse der Selbstüberwachung und -regulation durchführen als Lernende,

welche die Strategie nicht ausführen. Richtig angewendet führt demnach sinnstiftendes Zeichnen dazu, dass Lernende durch Selbstüberwachung ihre Lernprozesse selbst steuern und so regulieren, dass gesetzte Lernziele erreicht werden.

Das Gelingen der Strategie des sinnstiftenden Zeichnens hängt jedoch auch davon ab, wie gut interne und externe Repräsentationen zusammenwirken. Der Wissenserwerb aus Sachtexten wird z. B. auch von der Struktur des Textes oder dessen Kohärenz beeinflusst (Leopold, 2009; McNamara & Kintsch, 1996; Rickheit & Schade, 2000), weshalb van Meter und Firetto (2013) sich im CMDC unter Berücksichtigung von Schnotz' (2005, 2014) ITPC mit der Beschaffenheit von Sachtexten und dem Einfluss dessen auf das sinnstiftende Zeichnen auseinandersetzen. Die Strukturierung eines Textes, z. B. durch die Einteilung in Abschnitte oder das Hervorheben von (Schlüssel-)Wörtern, kann das Textverstehen und damit die Auswahl der für die Zeichnung wichtigen Elemente positiv beeinflussen (Kintsch & Kintsch, 1996; van Meter & Firetto, 2013). McNamara und Kintsch (1996) haben in einer Studie gezeigt, dass das Hinzufügen expliziter referentieller Beziehungen zur Erhöhung der Kohärenz eines Textes auch das Textverständnis erhöht. Im Kontext des sinnstiftenden Zeichnens bedeutet das, dass „a highly constrained text uses words that can be easily translated from the descriptive symbols of a propositional network into the depictive mental model“ (van Meter & Firetto, 2013, S. 261). Ist daher ein Text zu abstrakt, fehlen der propositionalen Repräsentation wichtige Details, um die abstrakte deskriptive Repräsentation in eine depiktive Repräsentation zu übersetzen, sodass das Anfertigen einer repräsentationalen Zeichnung das Lernen nicht unterstützt. Ist aber auf der anderen Seite ein Text zu detailliert in der Beschreibung eines Sachverhalts, müssen Lernende nicht auf generative Verarbeitungsprozesse zurückgreifen und die Konstruktion eines mentalen Modells wird umgangen. In diesem Fall können die Worte des Textes beim Lesen stückweise in ein Vorstellungsbild übersetzt werden. Da dabei allerdings sowohl das Instruktionsmaterial als auch das Erstellen der Zeichnung an sich nur oberflächlich abgehandelt werden, können Lernende auch in diesem Fall nicht von der Anwendung der Strategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren. Da die Erstellung einer Zeichnung hohe Anforderungen an die kognitive Verarbeitung stellt (Leutner, Leopold & Sumfleth, 2009) und es daher bei unzureichender Unterstützung keine Garantie gibt, dass Lernenden die nötigen kognitiven Kapazitäten zur Verfügung stehen, um ein mentales Modell auszubilden, kommen der Struktur und der Kohärenz des Lernmaterials eine besondere Bedeutung zu. Van Meter und Firetto (2013) postulieren daher, dass für den Erfolg der Zeichenstrategie die Beschaffenheit des Textes zwischen diesen beiden Extremen liegen muss.

Schlussendlich wird in der Forschung häufig die Konstruktion eines mentalen Modells als das zentrale Ziel einer jeden Lernbemühung angesehen, da dieses für besseren Wissensabruf und bessere Transferleistung verantwortlich gemacht wird (z. B. Ainsworth, 2006; Azevedo, Cromley & Seibert, 2004). Allerdings zeigen einige Studien auch die Grenzen des mentalen Modells auf (z. B. Meyer, Rasch & Schnotz, 2010; Rasch & Schnotz, 2009; Schnotz & Bannert, 2003). Schnotz und Bannert (2003) führten eine Studie zur *structure mapping hypothesis* durch, welche besagt, dass wenn sich externe Repräsentationen strukturell unterscheiden, sich diese Unterschiede auch auf das mentale Modell auswirken. Diese strukturellen Unterschiede würden sich nach der Hypothese insbesondere in Lernerfolgstests widerspiegeln: Lernende, die zum mentalen Modell konsistente Tests absolvierten, würden demnach ein besseres Ergebnis erzielen als Lernende, die zu ihrem mentalen Modell inkonsistente Tests bekämen. In der von Schnotz und Bannert (2003) durchgeführten Studie konnte die Gültigkeit der Hypothese bestätigt werden. Die Lernenden hatten im Lernerfolgstest dann einen Vorteil, wenn dieser strukturell an das vorher bearbeitete Lernmaterial angepasst war. Van Meter und Firetto (2013) folgern aus diesem Ergebnis im Kontext des CMDC, dass wissensbasierte Leistungen in einem Lernerfolgstest an die spezifischen Merkmale des konstruierten mentalen Modells gebunden sind. Eine verbesserte Leistung kann demnach nur erwartet werden, wenn die eingesetzten Lernerfolgstests gut auf die Merkmale der spezifischen Wissensrepräsentation abgestimmt sind.

1.2.3 Empirische Befunde zur Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens

Während beim Lernen mit einem Text und einer vorgegebenen Abbildung Lernenden häufig Strategien fehlen, Bildinformationen richtig zu lesen (z. B. Brandstetter et al., 2017) und Abbildungen entsprechend nur oberflächlich betrachtet werden (z. B. Cheng & Gilbert, 2014), sind Lernende bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens selbst für das Erstellen einer geeigneten visuellen Repräsentation zu einem Text verantwortlich. Eine Abbildung muss also zunächst nicht als Ganzes erfasst werden, sondern Lernende müssen sie zunächst selbst Stück für Stück aus den selektierten Textelementen zusammensetzen, sodass nicht nur der generelle Aufbau, sondern auch die Zusammenhänge einzelner Elemente sowie spezifische Details erfasst werden, die beim Betrachten einer fertigen Abbildung leicht übersehen werden können.

Die Effektivität des sinnstiftenden Zeichnens ist in den letzten 30 Jahren immer wieder in verschiedenen Variationen von Altersgruppen und Inhaltsbereichen untersucht worden (Übersichten bieten Ainsworth et al., 2011; Alesandrini, 1984; Fiorella & Mayer, 2015; Leutner & Schmeck, 2014; van Meter & Garner, 2005; van Meter & Firetto, 2013). Die Befunde fallen jedoch unterschiedlich aus: Während einige Studien die Wirksamkeit selbst generierter Visualisierungen auf den Lernerfolg belegen können (z. B. Alesandrini, 1981; Gobert & Clement, 1999; Hall, Bailey & Tillman, 1997; Leopold & Leutner, 2012; Lesgold, Levin, Shimron & Guttmann, 1975; Lesgold, Good & Levin, 1977; Mason, Lowe & Tornatora, 2013; Scheiter, Schleinschok & Ainsworth, 2017; Schmeck et al., 2014; Schmidgall, 2017; Schwamborn, Thillmann, Leopold, Sumfleth & Leutner, 2010; Schwamborn, Mayer, Thillmann, Leopold & Leutner, 2010; Seufert, Zander & Brünken, 2007; van Meter, 2001; van Meter, Aleksic, Schwartz & Garner, 2006), zeigen die Ergebnisse anderer Studien, dass Lernende nicht immer von der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren (z. B. Leopold, Sumfleth & Leutner, 2013; Leutner et al., 2009; Rasco, Tennyson & Boutwell, 1975; Schwamborn, Thillmann, Opfermann & Leutner, 2011; Snowman & Cunningham, 1975; Tirre, Manelis & Leicht, 1979).

Bei genauerer Betrachtung der empirischen Befundlage lassen sich einige Randbedingungen ausfindig machen, die auf die Lernwirksamkeit des sinnstiftenden Zeichnens einwirken. Demnach kann die Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens dann ihr volles Potenzial entwickeln, wenn Lernende in der Lage sind, qualitativ hochwertige Zeichnungen zu erstellen, ohne sich bei diesem Visualisierungsprozess kognitiv zu überlasten.

Wie beim Lernen mit einem Text und vorgegebenen Abbildungen spielt auch beim sinnstiftenden Zeichnen die Qualität der Abbildungen eine wesentliche Rolle. Die Grundlage für tieferes Verstehen bildet die Fähigkeit der Lernenden, die relevanten Informationen und Relationen der im Text beschriebenen und im Bild dargestellten Sachverhalte wahrzunehmen, aufeinander zu beziehen und in ein kohärentes mentales Modell zu überführen (Schnotz & Lowe, 2003; Stern, Aprea & Ebner, 2003). Dementsprechend müssen Lernende beim Anwenden der Strategie des sinnstiftenden Zeichnens in der Lage sein, eine qualitativ hochwertige und genaue Zeichnung zu erstellen, welche die relevanten Informationen und Relationen des Sachtextes enthält. Unter Qualität (oder Akkuratheit) der Zeichnung wird in diesem Zusammenhang verstanden, inwieweit die im Text beschriebenen Elemente (Objekte, Strukturen) von den Lernenden korrekt identifiziert und räumlich korrekt (d. h., wie im Text beschrieben) in der Zeichnung dargestellt wurden. Van Meter und Garner (2005) nennen

dies „drawing accuracy“, welche sie definieren als “the degree to which completed drawings resemble the represented object(s)” (S. 299).

Einige Studien haben bereits den Zusammenhang zwischen der Qualität der selbst erstellten Abbildungen und dem Lernerfolg untersucht und einen positiven Zusammenhang gefunden: Je höher die Qualität der selbst erstellten Zeichnungen war, desto besser schnitten Lernende in einem Lernerfolgstest ab (z. B. Greene, 1989; Hall et al., 1997; Leopold & Leutner, 2015; Lesgold et al., 1975; Mason, Lowe et al., 2013; Rellensmann et al., 2017; Scheiter et al., 2017; Schmeck et al., 2014; Schmidgall, 2017; Schwamborn, Mayer et al., 2010; van Meter, 2001; van Meter et al., 2006). Auf Grundlage dieser Ergebnisse postulierten Schwamborn et al. (2010; siehe auch Leutner & Schmeck, 2014) das *prognostic drawing principle*, welches besagt, dass “the quality of learners’ drawings during learning predicts the quality of their learning outcomes” (S. 878).

Das Erstellen qualitativ hochwertiger Zeichnungen wird maßgeblich davon getragen, dass Lernende „gezwungen“ sind, aktiv den Lernprozess zu gestalten, indem sie relevante Informationen aus dem Text selektieren, organisieren und integrieren und gleichzeitig sich selbst bei diesen Prozessen überwachen und gegebenenfalls selbst regulieren. Aufgrund der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses kann sich jedoch die Belastung durch die kognitiven und metakognitiven Prozesse des Zeichnens negativ auf den Lernerfolg auswirken (Paas & Sweller, 2014). In einer Studie von Leutner et al. (2009) lernten 111 Schülerinnen und Schüler einer zehnten Klasse in vier verschiedenen Gruppen mit einem Sachtext über die Dipolarität von Wassermolekülen. Die Kontrollgruppe lernte nur mit dem Text (Gruppe 1), während die anderen Gruppen die Instruktion erhielten, zunächst den Text zu lesen und anschließend entweder Zeichnungen zum Text zu erstellen (Gruppe 2), die Inhalte des Textes mental zu visualisieren (Gruppe 3) oder erst zu zeichnen und dann mental zu visualisieren (Gruppe 4). Alle Gruppen gaben nach der Erfüllung ihrer Aufgaben ihre kognitive Belastung an. Die Ergebnisse zeigen u. a., dass Lernende mit Zeicheninstruktion ein leicht höheres Textverständnis erwarben als Lernende in der Kontrollgruppe. Letztere erwarben aber wiederum ein leicht höheres Textverständnis als Lernende mit Visualisierungs- und Zeicheninstruktion. In beiden Gruppen mit Zeicheninstruktion gaben Lernende jedoch an, kognitiv hoch belastet gewesen zu sein, während eine deutlich geringere kognitive Belastung (und ein deutlich besseres Textverständnis) bei Lernenden festgestellt werden konnte, die den Text nur mental visualisierten. Eine Mediationsanalyse ergab, dass der Effekt der negativen Auswirkung der Zeicheninstruktion auf das Textverständnis über die erhöhte kognitive Belastung vermittelt wird. Leutner et al. (2009) kamen zu dem Schluss, dass die zur Erstellung

einer Zeichnung notwendigen kognitiven Ressourcen zu Lasten jener kognitiven Prozesse gehen, die zu besserem Textverständnis führen.

Andere Studien konnten hingegen zeigen, dass Lernende trotz der durch den Zeichenprozess verursachten hohen kognitiven Belastung von der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren können, wenn sie angemessene instruktionale Unterstützung erhalten (z. B. Ainsworth, 2010; Schmeck et al., 2014; Schmidgall, 2017; Schwamborn, Thillmann et al., 2010; Schwamborn, Mayer et al., 2010; Schwamborn et al., 2011; van Meter, 2001; van Meter et al., 2006; für eine Übersicht siehe Leutner & Schmeck, 2014). Ainsworth (2010) untersuchte, ob eine Instruktion zum Selbsterklären des im Text beschriebenen Sachverhalts vor der Erstellung der Zeichnung den Zeichenprozess sinnvoll unterstützen kann. In einer Pilotstudie lasen Studierende einen Text zum Herz-Kreislaufsystem des Menschen und bekamen entweder die Instruktion, sich den Text selbst zu erklären, eine Zeichnung zu erstellen oder zuerst sich den Text selbst zu erklären und anschließend eine Zeichnung zu erstellen. Lernende, die sich zunächst den Text selbst erklärten und anschließend zeichneten, schnitten in einem Lernerfolgstest besser ab als Lernende, die nur zeichneten oder sich nur den Text selbst erklärten.

Inwiefern instruktionale Hilfen nach dem eigentlichen Zeichenprozess förderlich sein können, zeigen die Studien von van Meter (2001) und van Meter et al. (2006). In der Studie von van Meter (2001) erhielten 59 Fünftklässler und 41 Sechstklässler einen Text über das zentrale Nervensystem. Eine Gruppe erhielt nur den Text mit vorgegebenen Bildern und diente als Kontrollgruppe, während drei weitere Gruppen Zeichnungen erstellen sollten und dabei unterschiedliche instruktionale Unterstützung erhielten. Eine Gruppe erhielt nur eine Zeicheninstruktion, während eine zweite Gruppe nach dem Zeichenprozess vorgegebene Bilder erhielt, mit denen sie ihre eigene Zeichnung vergleichen sollten. Eine dritte Gruppe beantwortete, zusätzlich zu den vorgegebenen Bildern nach dem Zeichenprozess, mündlich Fragen, die den Vergleichsprozess zwischen der eigenen Zeichnung und dem vorgegebenen Bild anregen sollten. Lernende der Gruppe mit Zeicheninstruktion, Vergleichsbildern und Vergleichsfragen erstellten die qualitativ hochwertigsten Zeichnungen und schnitten in einem Lernerfolgstest besser ab als die Kontrollgruppe. Weiterhin konnte anhand von Protokollen des lauten Denkens festgestellt werden, dass Lernende der Gruppe mit Zeicheninstruktion, Vergleichsbildern und Vergleichsfragen mehr metakognitive Strategien der Selbstüberwachung anwendeten als Lernende der anderen Zeichengruppen.

In einer Folgestudie untersuchten van Meter et al. (2006), ob Lernende weniger instruktionale Unterstützung beim Lernen benötigen, wenn sie bereits über Vorwissen zu der zu lernenden Thematik verfügen. Dieser Hypothese geht die Überlegung voraus, dass Vorwissen selbst eine Art von Unterstützung darstellt, insbesondere dann, wenn das Vorwissen räumlich-visuelle Informationen passend zum Textinhalt umfasst. Während die drei Experimentalbedingungen identisch zu den aus der Studie von 2001 angelegt waren, erhielt nun auch die Kontrollgruppe nach dem Lesen des Textes Fragen, um die vorgegebenen Bilder mit dem eigenen Textverständnis abzugleichen. Diesmal schnitten neben den Lernenden der Gruppe mit Zeicheninstruktion, Vergleichsbildern und Vergleichsfragen auch die Lernenden der Gruppe mit vorgegebenen Bildern nach dem Zeichenprozess besser in einem Lernerfolgstest ab als die Kontrollgruppe.

Schwamborn et al. (2010) untersuchten, wie instruktionale Hilfen schon während des Zeichenprozesses Lernende unterstützen und kognitiv entlasten können. Dazu lasen 196 Schülerinnen und Schüler einer neunten Klasse einen Text über das Wäschewaschen mit Wasser und Seife. Neununddreißig Schülerinnen und Schüler bekamen keine weitere Instruktion, während die restlichen 157 Schülerinnen und Schüler, zu gleichen Teilen auf vier Gruppen mit variierenden Hilfestellungen aufgeteilt, eine Zeicheninstruktion erhielten. Allen Zeichengruppen gemein waren zwei grundlegende instruktionale Hilfen: ein Zeichenhintergrund, auf dem bereits Elemente vorgegeben waren, und eine Werkzeugleiste, welche grafische Repräsentationen aller relevanten Elemente enthielt. Die Lernenden erstellten Zeichnungen zu dem Sachtext, indem sie die in der Werkzeugleiste abgebildeten Elemente an die richtige Stelle des vorgegebenen Zeichenhintergrunds zeichneten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lernenden in allen Gruppen mit Zeicheninstruktion in einem Lernerfolgs- und Transferwissenstest besser abschnitten als die Lernenden der Kontrollgruppe. Schwamborn et al. (2010) halten fest, dass das Anfertigen eigener Zeichnungen zu einem Text sinnstiftende Verarbeitungsprozesse fördern kann, sofern mithilfe von instruktionalen Hilfen die kognitive Belastung reduziert wird, welche durch den Zeichenprozess selbst entsteht. Unter dieser Grundbedingung und auf Grundlage der Befunde zur Wirksamkeit des sinnstiftenden Zeichnens postulierten Schwamborn et al. (2010; siehe auch Leutner & Schmeck, 2014) das *generative drawing principle*: „People learn better from a science text when they are asked to draw illustrations representing the main ideas of the text“ (S. 878).

Um das *generative drawing principle* und das *prognostic drawing principle* über mehrere Studien hinweg zu replizieren und damit zu generalisieren⁸, führten Schmeck et al. (2014) zwei Folgeexperimente durch, bei denen dieses Mal ein Text über die Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren eingesetzt wurde. Weiterhin sollte die Wirksamkeit der instruktionalen Unterstützung während des Zeichnens (Werkzeugleiste und Zeichenhintergrund) weiter untersucht werden.

Im ersten Experiment schnitten die Lernenden der Experimentalgruppe (Text lesen und Zeicheninstruktion) in einem Lernerfolgstest (bestehend aus Behaltens- und Transferfragen) besser ab als Lernende einer Kontrollgruppe, die den Text nur lasen. Die Qualität der Zeichnungen innerhalb der Zeichengruppe sagte dabei den Erfolg im Lernerfolgstest voraus. Im zweiten Experiment lag der Fokus der Untersuchung darauf, ob der im ersten Experiment festgestellte höhere Lernerfolg auf die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens oder auf die zusätzlichen Abbildungen in der Werkzeugleiste zurückzuführen gewesen ist, da Letzteres in Verbindung mit dem Text eine multimediale Lernumgebung darstellt. Dazu wurden 168 Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufe 8 auf vier Gruppen aufgeteilt: Die erste Gruppe erhielt nur eine Leseinstruktion, die zweite zusätzlich zum Text vorgegebene Abbildungen, die dritte Gruppe erstellte Zeichnungen zum Text und die vierte Gruppe erhielt nach dem Zeichnen vorgefertigte Abbildungen, mit denen sie ihre Zeichnungen vergleichen sollten. Im anschließenden Lernerfolgstest schnitten die Lernenden, die nur eine Zeicheninstruktion erhalten hatten, besser ab, als die Lernenden der anderen drei Gruppen. Weiterhin unterschieden sich letzte Gruppen nicht signifikant voneinander.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens zu einem tieferen Verständnis der Inhalte eines Sachtextes beitragen kann, sofern Lernende mit geeigneten instruktionalen Hilfen kognitiv entlastet werden und qualitativ hochwertige Zeichnungen erstellen. Die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens ist häufig erfolgreich im Zusammenhang mit naturwissenschaftlichen Texten eingesetzt worden, welche die Funktionsweise eines Ursache-Wirkungssystem beschreiben (wie z. B. den chemischen Prozess des Wäschewaschens oder die Funktionsweise des zentralen Nervensystems). Die Zeichnungen, welche in den meisten Studien vornehmlich auf Papier⁹ angefertigt wurden, sollten da-

⁸ Siehe Shavelson und Towne (2002), die das Replizieren und Generalisieren von Ergebnissen über mehrere Studien hinweg als eines der sechs wesentlichen wissenschaftlichen Prinzipien der Bildungsforschung einstufen.

⁹ Schmidgall (2017) setzte Tablets ein, auf denen die Probanden mittels eines digitalen Stifts zeichneten.

bei eher repräsentationale Abbildungen der im Text dargestellten Sachverhalte sein und weniger künstlerische Darstellungen (Fiorella & Mayer, 2015). Generell bietet das sinnstiftende Zeichnen den Vorteil, dass Lernende nicht nur gezwungen sind, sich aktiv mit den verschiedenen Ebenen und Elementen der zu erstellenden Abbildung mental auseinanderzusetzen, sondern dass Lernenden nach dem Zeichenprozess weiterhin auch eine externalisierte visuelle Repräsentation für das weitere Lernen vorliegt. Somit erstellen Lernende sich selbst ihre eigene multimediale Lernumgebung (Ainsworth, 2014; Butcher, 2014; Mayer, 2014c).

Dass die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens tiefergehende Verarbeitungsprozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens fördern kann und somit zu einem tieferen Verständnis des zu lernenden Sachverhalts führt, ist bisher ausschließlich unter Verwendung von Lernerfolgstests elaboriert worden. Untersuchungen zu anderen Indikatoren tiefer kognitiver Verarbeitung wurden zwar allgemein im Hinblick auf multimediales Lernen, nicht aber explizit für das sinnstiftende Zeichnen durchgeführt. Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist es, erstmalig anhand von Blickbewegungsanalysen die dem sinnstiftenden Zeichnen zugrundeliegenden kognitiven Verarbeitungsprozesse zu erfassen. Weiterhin sollen anhand der aufgezeichneten Blickbewegungen die im CMDC aufgestellten Modellannahmen bezüglich der verstärkten Fokussierung auf die zentralen Elemente des Textes und des metakognitiven Potenzials des sinnstiftenden Zeichens überprüft werden.

1.3 Eye-Tracking als Methode zur Analyse visueller Aufmerksamkeit

1.3.1 Grundlagen zur Erfassung von Blickbewegungen

Eye-Tracking ist eine Methode zur systematischen Aufzeichnung des Blickverhaltens. Durch das Aufzeichnen von Blickbewegungen ist es möglich nachzuvollziehen, worauf Personen gerade in einem bestimmten Moment ihre Aufmerksamkeit richten. Die Erforschung der visuellen Aufmerksamkeit von Menschen¹⁰ ist seit über einem Jahrhundert Gegenstand vieler Untersuchungen, wobei die ersten eingesetzten Eye-Tracker schwierig zu bauen, größ-

¹⁰ Aufgrund der stetig besser werdenden Technik im Bereich der nicht-invasiven Blickbewegungserfassung, werden Blickbewegungsmessungen auch zunehmend in Studien mit Tieren eingesetzt. Shepherd und Platt (2006) haben einen nicht-invasiven videobasierten Infrarot Eye-Tracker entwickelt und damit die visuelle Orientierung von Lemuren untersucht. Williams, Mills und Guo (2011) haben einen Eye-Tracker für Hunde vorgestellt, der sich für die Untersuchung visueller Aufmerksamkeit von Hunden sowie zur Erfassung von Kognition und sozialer Interaktion eignet.



Abbildung 6: Eye-Tracking-Brille der Firma SensoMotoric Instruments, Modell: SMI ETG 1.5 (eigene Abbildung).

tenteils mechanisch und sehr unkomfortabel für die Versuchspersonen waren (einen Überblick liefern z. B. Duchowski, 2017; Holmqvist et al., 2011). Delabarre (1898) nutzte z. B. eine Lösung aus zwei bis drei Prozent Kokain, um den Augapfel zu anästhesieren. Anschließend wurde ein Gestell aus Draht und Gips am Auge befestigt, welches über einen Faden mit einer mechanischen Apparatur verbunden war, die sich dadurch synchron mit den horizontalen Bewegungen des Auges bewegte. Moderne Blickbewegungstechnik setzt heute hingegen auf eine Kombination aus computergesteuerter Hard- und Software und ist durch stetige Weiterentwicklung sehr viel kompakter geworden (siehe Abbildung 6). Das dominierende Verfahren zur Erfassung von Blickbewegungen ist die Cornea-Reflex-Methode, bei der Infrarotlichtstrahlen auf das Auge gerichtet werden, während eine oder mehrere Videokameras Bilder des Auges aufzeichnen. Über einen Algorithmus werden anschließend auf den Bildern die Pupille und die Reflexion des Lichts auf der Hornhaut bestimmt (siehe Abbildung 7). Bewegt sich das Auge, verändert sich der Abstand zwischen der Pupille und der durch den Infrarotstrahl erzeugten Reflexion, wodurch sich in Kombination mit den Parametern der Umgebung (z. B. den Maßen des auf dem Computermonitor angezeigten Stimulus) der Punkt errechnen lässt, den das Auge gerade anfixiert (Jarodzka, 2010; eine technisch detaillierte Erklärung findet sich bei Duchowski, 2017). Mithilfe computergestützter Algorithmen können aus den Rohdaten schließlich Informationen über die Fixationen, Sakkaden

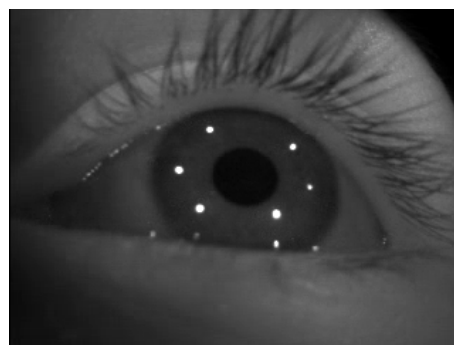


Abbildung 7: Bild eines linken Auges während des Eye-Trackings (eigene Abbildung).

und gleitenden Augenfolgebewegungen (smooth pursuits) des Probanden entnommen werden.

Fixationen sind das am häufigsten berichtete Ereignis bei der Analyse von Eye-Tracking Daten. Eine Fixation bezieht sich dabei aber nicht auf eine Bewegung des Auges, sondern beschreibt im Gegenteil den Zustand, in dem sich das Auge für einen bestimmten Zeitraum scheinbar nicht bewegt¹¹ – etwa wenn das Auge beim Lesen auf einem Wort kurz verharret. Während einer Fixation, welche zwischen einigen Millisekunden und mehreren Sekunden andauern kann, werden optische Informationen bewusst wahrgenommen und verarbeitet. Eine Sakkade ist hingegen die schnelle Bewegung des Auges von einer Fixation zur nächsten. Ein Sakkadensprung ist mit einer Dauer von durchschnittlich 30 - 80 Millisekunden die schnellste Bewegung, die der Körper ausführen kann. Während dieser Bewegung nimmt das Auge keine Informationen auf und ist somit zeitweise „blind“ (Duchowski, 2017; Holmqvist et al., 2011). Wenn das Auge einem sich bewegenden Objekt folgt, spricht man von einer gleitenden Augenfolgebewegung (smooth pursuit), bei der wie bei Fixationen Informationsverarbeitung im Arbeitsgedächtnis stattfindet. Bei dieser Augenbewegung passen sich die Augen an die Geschwindigkeit des verfolgten Objekts an, sodass gleitende Augenfolgebewegungen langsamer als Sakkaden sind. Sakkaden und gleitende Augenfolgebewegungen sind dabei zwei gänzlich verschiedene Augenbewegungen, die von unterschiedlichen Hirnarealen gesteuert werden. Während gleitende Augenfolgebewegungen zwingend ein zu verfolgendes Objekt voraussetzen, können Sakkaden auf einer weißen Wand, im Dunkeln oder gar völlig ohne Stimuli durchgeführt werden (Holmqvist et al., 2011).

Basierend auf der Funktionalität des Auges nennt Duchowski (2017) Fixationen, Sakkaden und gleitende Augenfolgebewegungen als die drei einzig zu berücksichtigenden Arten von Augenbewegungen, mit denen Einsicht in die visuelle Aufmerksamkeit gewonnen werden kann¹². Da jedoch in den Untersuchungen dieser Arbeit keine sich bewegenden und zu verfolgenden Objekte vorkommen, werden gleitende Augenfolgebewegungen im Folgenden nicht weiter thematisiert.

¹¹ Dies ist eine vereinfachte Definition der Fixation, da das Auge tatsächlich niemals gänzlich ruht. Aus neurologischer Perspektive sind Fixationen gekennzeichnet durch drei Arten von Mikrobewegungen: Tremoren, Drifts und Mikrosakkaden. Nähere Ausführungen dazu z. B. bei Leigh & Zee, 2015; Nuthmann, Engbert & Kliegl, 2006.

¹² Holmqvist et al. (2011) haben einen umfassenden Leitfaden zu Messmethoden und Eye-Tracking-Maßen zusammengestellt, in welchem die verschiedenen Einsatz- und Interpretationsmöglichkeiten einzelner Eye-Tracking-Maße aufgeführt werden.

1.3.2 Blickbewegungen als Indikatoren für kognitive Verarbeitung

Die Erfassung von Blickbewegungen mittels Eye-Tracking erlaubt einen Einblick in die visuelle Aufmerksamkeit, das Suchverhalten und laufende kognitive Verarbeitungsprozesse des Probanden. Die Analyse von Blickbewegungen lässt also Rückschlüsse darüber zu, mit welchen Objekten sich ein Proband für wie lange und in welcher Reihenfolge beschäftigt hat (Jarodzka, 2010; Scheiter & van Gog, 2009). Daher hat sich die Methode des Eye-Trackings besonders in angewandter Forschung der Informationsverarbeitung etabliert. Die Analyse von Blickbewegungen wird bereits häufig in der Erforschung von Leseprozessen (z. B. Radach, Günther & Huestegge, 2012; Rayner, 1998, 2009), von Szenenwahrnehmungen (z. B. Henderson, 2003) oder von Mensch-Maschine-Interaktionen eingesetzt (z. B. Jacob & Karn, 2003).

Die Verwendung von Blickbewegungsanalysen als Forschungswerkzeug erfordert allerdings die Interpretation der Beziehung zwischen Augenbewegungen und kognitiver Verarbeitung. Nach der Eye-Mind-Hypothese (Just & Carpenter, 1976, 1980; eine Rezension findet sich bei Rayner, 1998) ist davon auszugehen, dass bei komplexen Informationsverarbeitungsprozessen (wie z. B. dem Lesen) eine direkte Beziehung zwischen Fixationen und kognitiver Informationsverarbeitung besteht: Je länger dabei die Fixationsdauer ist, desto umfangreicher findet kognitive Verarbeitung statt (z. B. Hannus & Hyönä, 1999; Hegarty, Mayer & Green, 1992; Hegarty & Just, 1993; Kragten et al., 2015; She & Chen, 2009; Underwood, Humphrey & Foulsham, 2008). Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass der Verschiebung der Aufmerksamkeit eine Sakkade zur entsprechenden Position vorausgeht (Deubel & Schneider, 1996; Hoffman & Subramaniam, 1995; Kowler, Anderson, Doshier & Blaser, 1995; Rayner, McConkie & Ehrlich, 1978; Remington, 1980).

Obwohl die Erfassung von Blickbewegungen wertvolle Informationen über kognitive Verarbeitungsprozesse liefern kann, ist es aufgrund der notwendigen Interpretation der Blickbewegungsdaten unmöglich mit absoluter Sicherheit zu sagen, was eine Person gerade beim Ausführen einer Aufgabe denkt. Daher kann es Situationen geben, in denen zwar aufgabenrelevante Objekte von den Augen fixiert werden, jedoch keine kognitive Verarbeitung der einzelnen Elemente des Objekts im Arbeitsgedächtnis stattfindet (Hyrskykari, Ovaska, Majaranta, Räihä & Lehtinen, 2008; Triesch, Ballard, Hayhoe & Sullivan, 2003). Holsanova, Holmberg und Holmqvist (2008) weisen zudem darauf hin, dass häufige Sakkaden zwischen Text und Bild entweder als Integrationsprozesse der beiden Repräsentationen interpretiert

werden können oder aber Schwierigkeiten verdeutlichen, überhaupt eine Verbindung zwischen Text und Bild herzustellen. Bei einer Blickbewegungsuntersuchung zur visuellen Aufmerksamkeit während des Autofahrens fanden Underwood, Chapman, Berger und Crundall (2003) zudem heraus, dass ca. 20 % der von den Probanden scheinbar nicht angeschauten Objekte trotzdem hinterher genannt werden konnten. Weiterhin können aber auch Informationsverarbeitungsprozesse über die Fixation des Gegenstandes hinaus andauern – etwa dann, wenn nach dem Lesen eines Satzes über jenen nachgedacht wird und die Augen bereits einen völlig anderen Punkt fixieren (Holmqvist et al., 2011).

Um die Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretationen zu verringern, sollten neben der Aufnahme der Blickbewegungen daher noch weitere Messinstrumente berücksichtigt werden, wie z. B. Lernerfolgstests oder Protokolle lauten Denkens (*methodische Triangulation*; Denzin, 1970; Holmqvist et al., 2011; Jarodzka, 2010). Die Methode des lauten Denkens hat bei gleichzeitigem Aufzeichnen der Augenbewegungen jedoch den Nachteil, dass durch das Aussprechen der Gedanken das Blickverhalten stark beeinflusst wird. In komplexen Aufgaben kann z. B. der Sprachplanungsprozess die Position der Augen so verändern, dass diese nicht mehr den gerade beschriebenen Gegenstand fixieren (Holsanova, 2008). Ebenso führt lautes Lesen zu längeren Fixationsdauern als etwa stilles Lesen (Rayner, 2009). Eine Alternative bietet das unterstützte retrospektive laute Denken (*cued retrospective reporting*), bei dem Probanden eine Aufzeichnung ihrer Blickbewegungen vorgeführt bekommen und diese hinsichtlich ihrer Gedankengänge kommentieren (z. B. Jarodzka, Scheiter, Gerjets & van Gog, 2010; Koning, Tabbers, Rikers & Paas, 2010; van Gog, Paas, van Merriënboer & Witte, 2005; eine Übersicht bieten van Gog & Jarodzka, 2013).

1.3.3 Empirische Befunde von Blickbewegungsmessungen in multimedialen Lernumgebungen

In den letzten Jahren erfreut sich das Erfassen von Blickbewegungen als methodisches Werkzeug auch im Bereich des multimedialen Lernens immer größerer Beliebtheit. Wie in Kapitel 1.1.3 dargestellt, haben sich bereits viele Studien mit der Effektivität multimedialer Lernumgebungen auseinandergesetzt. In den meisten Fällen wurden bisher Schlussfolgerungen über die kognitiven Effekte verschiedener Arten multimedialer Lernmaterialien auf der Grundlage von Leistungsmessungen (Behaltens- und Transfertesten) und / oder Messungen kognitiver Belastung getroffen. Mithilfe von Blickbewegungsmessungen können nun Daten über kognitive und perzeptuelle Prozesse auf einer viel feineren Ebene erhoben werden, als

dies beispielsweise über verbale Berichte oder Fragebögen möglich ist. Darüber hinaus scheint die Methode des Eye-Trackings sehr geeignet zur Erfassung von Prozessen zu sein, die nicht unbedingt über Selbstbeobachtungen zugänglich sind (Scheiter & van Gog, 2009; van Gog & Scheiter, 2010; eine Übersicht zur Erfassung kognitiver und metakognitiver Prozesse mithilfe von Blickbewegungsmessungen in computerbasierten Lernumgebung bieten van Gog & Jarodzka, 2013). So konnten aus Blickbewegungsanalysen z. B. neue Erkenntnisse darüber abgeleitet werden, welche Prozesse dem *split-attention effect*¹³ zugrunde liegen. In einer Studie von Hegarty und Just (1993) wurden die Blickbewegungen von Studierenden aufgezeichnet, die am Computer einen Text und eine vom Text separat dargestellte Abbildung bearbeiteten. Die Ergebnisse zeigen, wie oft Lernende zwischen dem Text und der Abbildung hin und her wechselten und dass Lernende meistens am Ende eines Satzes oder eines Absatzes ihre Aufmerksamkeit vom Text auf die beigefügte Abbildung verlagerten. Hegarty und Just (1993) folgerten daraus, dass Lernende eher dazu tendieren, zunächst die Informationen aus einem Satz oder einem Textabschnitt vollständig zu erfassen, bevor sie sich dem gleichen Sachverhalt in einer anderen Repräsentationsform annähern und Integrationsversuche beider Repräsentationsformen unternehmen. Hannus und Hyönä (1999) konnten in ihrer Studie zeigen, dass Lernende die meiste Lernzeit auf das Lesen des Textes verwenden und nur 6 % der Lernzeit auf das Betrachten der beigefügten Abbildungen. Dieses Ergebnis deutet nach Hannus und Hyönä (1999) daraufhin, dass Lernen eher textbasiert stattfindet. Schmidt-Weigand, Kohnert und Glowalla (2010) untersuchten die visuelle Aufmerksamkeit beim Lernen mit Text und Animationen und kamen zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Lernenden lasen nicht nur grundsätzlich zuerst den Text bevor sie ihre Aufmerksamkeit der Animation zuwendeten, sondern verbrachten auch mehr Zeit mit dem Lesen des Textes als mit dem Betrachten der Animationen.

Mehrere Studien haben zudem den Zusammenhang zwischen dem Lernerfolg beim Lernen mit grafischen Repräsentationen (mit und ohne zusätzlichem Text) und Blickbewegungsmaßen, wie Fixationen, Fixationsdauern und Sakkaden, untersucht (z. B. Boucheix & Lowe, 2010; Canham & Hegarty, 2010; Jarodzka et al., 2010; Johnson & Mayer, 2012; Koning et al., 2010; Kragten et al., 2015; Krejtz, Duchowski, Krejtz, Kopacz & Chrzastowski-Wachtel,

¹³ Der *split-attention effect* entsteht, wenn zwei aufeinander bezogene Informationsquellen (wie z. B. eine Abbildung zu einem Text) innerhalb des Lernmaterials getrennt voneinander dargeboten werden. Lernende müssen dann ihre Aufmerksamkeit auf zwei verschiedene Informationsquellen aufteilen, wodurch die Lernleistung gehemmt sein kann. Das „*split-attention principle*“ besagt daher, dass Lernmaterial so aufgebaut sein sollte, dass verschiedene Repräsentationen miteinander integriert dargestellt werden (z. B., indem die Gradzahlen der Winkel eines Dreiecks direkt an den entsprechenden Winkeln angegeben werden, anstatt sie separat in einer Bildunterschrift aufzuführen; Ayres & Sweller, 2014).

2016; Mason, Pluchino, Tornatora & Ariasi, 2013; Schmidt-Weigand et al., 2010; Schwonke et al., 2009). Mason und Pluchino et al. (2013) haben beispielsweise untersucht, ob sich in Verbindung mit einem Text besser abstrakte oder detaillierte ikonische Abbildungen zum Lernen eignen. Die Ergebnisse zeigen, dass Lernende, die mit einem Text und einer abstrakten Abbildung lernten, den Text effizienter verarbeiteten als Lernende mit detaillierteren Abbildungen (weniger Fixationen auf dem Text bei gleichem Lernerfolg) und mehr Versuche unternahmen, Bild- und Textinformationen miteinander zu integrieren (höherer Anteil an Blickwechseln zwischen Abbildung in Text). Zusätzlich ergab eine Korrelationsanalyse, dass die Fixationen und Fixationsdauern auf dem abstrakten Bild positiv sowohl mit dem direkt nach der Lernsituation eingesetzten Posttest zur Erfassung des Faktenwissens als auch mit einem verzögerten Posttest zur Erfassung des Faktenwissens korrelierten. Je mehr Fixationen auf der Abbildung waren und je länger sie anhielten, desto besser schnitten Lernende in den Posttests ab. Weiterhin korrelierten die Blickwechsel von der abstrakten Abbildung zurück in den Text positiv mit beiden Posttests. Schwonke et al. (2009) untersuchten den Umgang mit multiplen Repräsentationen, indem sie Psychologiestudierenden eine Lernumgebung bestehend aus einem Text, einem Diagramm und einer Gleichung vorlegten. Einer Gruppe wurde erklärt, wie das Diagramm beim Verständnis des Texts und der Gleichung helfen kann, während die andere Gruppe diese Information nicht erhielt. Insgesamt korrelierte das Ergebnis des abgefragten konzeptuellen Wissens mit der Fixationsdauer auf dem Diagramm, während es keine Korrelation mit dem Transferwissen gab.

Hinsichtlich der von Schnotz (2014) im ITPC angenommenen Trennung von depiktivem und deskriptivem Verarbeitungssystem und der daraus folgenden unterschiedlichen Funktion von Texten und Bildern beim Verstehen und Lernen konnten mithilfe von Blickbewegungsanalysen ebenfalls weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Hochpöchler et al. (2013) untersuchten anhand von Blickbewegungen die Dynamik der mentalen Modellkonstruktion. Dazu wurden die Blickbewegungen in verschiedenen Lernphasen von 40 Schülerinnen und Schülern von zufällig ausgewählten Gymnasien und Hauptschulen aufgezeichnet, die sich mit verschiedenen Text-Bild-Kombinationen aus Biologie- und Erdkundebüchern beschäftigten. Die Analyse der Blickbewegungen ergab, dass die Informationsverarbeitung zur Konstruktion eines mentalen Modells zunächst primär textgesteuert war, während beigefügte Bilder in dieser Lernphase nur flüchtig betrachtet wurden. Nachdem jedoch ein erstes mentales Modell konstruiert worden war, wurde der Text nur noch für aufgabenspezifische Modellaktualisierungen verwendet, während das Bild, je nach Aufgabenstellung, nun intensiv als leicht zugängliche visuelle Repräsentation des Textinhalts genutzt wurde. Hochpöchler

et al. (2013) schlossen daraus, dass Texte die konzeptuelle Analyse des Lesers systematisch leiten, da Sachverhalte Schritt für Schritt beschrieben werden, während ein Bild mehr als ein externes kognitives Werkzeug fungiert, welches als leicht zugängliche visuelle Darstellung je nach Bedarf zur selektiven Verarbeitung herangezogen werden kann.

Im Blickverhalten von Lernenden mit hoher oder niedriger Expertise lassen sich ebenfalls Unterschiede feststellen. Auf Grundlage desselben Datensatzes, den auch Hochpöchler et al. (2013) für ihre Studie nutzen, untersuchten Schnotz et al. (2014) den Einsatz der Strategien, die Lernende unterschiedlicher Schultypen bei der Integration von Text- und Bildinformationen verwenden. Zur Erfassung der kognitiven Selektionsprozesse wurden Fixationen und Fixationsdauern analysiert, während die direkten Blickwechsel zwischen Text und Bild (und umgekehrt) als Integrationsprozesse gedeutet wurden. Die Analyse der Fixationen und Blickwechsel zeigte, dass Schülerinnen und Schüler des Gymnasiums häufiger das Bild betrachteten und häufiger zwischen Text und Bild hin und her wechselten als die Schülerinnen und Schüler der Hauptschule. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass die Nutzung des Bildes zusätzlich zum Text durch den Schultyp moderiert wird. Weiterhin hatten Schülerinnen und Schüler der Hauptschule längere Fixationsdauern auf dem Text als die Gymnasiasten, da sie mehr Zeit zum Lesen der Texte benötigten. Schnotz et al. (2014) schlossen aus den Ergebnissen, dass die Schülerinnen und Schüler der Hauptschule weniger Strategien zur Verfügung haben, um Informationen aus multimedialen Lernmaterial in sinnstiftender Weise zu verarbeiten als Schülerinnen und Schüler des Gymnasiums.

In der bereits erwähnten Studie von Hannus und Hyönä (1999) konnte nicht nur gezeigt werden, dass der Fokus der Lernenden auf dem Text lag, sondern auch, dass Experten mehr Zeit mit der Betrachtung relevanter Textstellen und entsprechender Teile der Abbildung verbrachten als Novizen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Jarodzka et al. (2010), die in einer Studie die Wahrnehmung und Interpretation komplexer dynamischer visueller Stimuli bei Experten und Novizen untersucht haben. Im Vergleich zu den Blickbewegungen der Novizen achteten die Experten mehr auf die relevanten Aspekte der gezeigten Animation (einen Überblick über das unterschiedliche Blickverhalten von Experten und Novizen bieten z. B. Gegenfurtner, Lehtinen & Säljö, 2011; Jarodzka, Holmqvist & Gruber, 2017; Reingold & Sheridan, 2011).

In diesem Zusammenhang können aufgezeichnete Blickbewegungen von Experten auch dazu genutzt werden, das Blickverhalten von Novizen bei der Bearbeitung von multimedia-

lem Lernmaterial zu verbessern und dadurch kognitive wie metakognitive Verarbeitungsprozesse zu fördern (Lehren durch *eye movement modeling examples* (EMME); Gegenfurtner, Lehtinen, Jarodzka & Säljö, 2017; Jarodzka, van Gog, Dorr, Scheiter & Gerjets, 2013; Mason, Pluchino & Tornatora, 2015; van Gog, Jarodzka, Scheiter, Gerjets & Paas, 2009; eine Übersicht findet sich bei van Gog & Jarodzka, 2013). EMMEs scheinen sich jedoch nicht für das Vermitteln von prozeduralen Problemlösekompetenzen (wie z. B. dem Bestimmen eines Winkels mittels des Wechselwinkelsatzes) zu eignen (van Marlen, van Wermeskerken, Jarodzka & van Gog, 2016).

Die Methode des Eye-Trackings zur Erfassung von Indikatoren kognitiver Verarbeitungsprozesse in multimedialen Lernumgebungen hat sich in den letzten Jahren als sinnvolles Werkzeug erwiesen, empirische, theoretische und praktische Erkenntnisse über multimediales Lernen zu gewinnen. Die Erfassung von Blickbewegungen wurde in vielen Studien erfolgreich dazu eingesetzt, die Selektions- und Integrationsprozesse von Lernenden zu erfassen und auszuwerten. Weiterhin liefert das unterschiedliche Blickverhalten von Experten und Novizen Erkenntnisse darüber, wie das Vorwissen die Verarbeitung multimedialer Lerninhalte beeinflusst. In den oben aufgeführten Studien wurde das Blickverhalten von Lernenden am Computer untersucht. Studien, in denen das Blickverhalten von Lernenden mit papierbasierten multimedialen Lernmaterialien untersucht wird, sind hingegen rar. Moderne tragbare Eye-Tracker (siehe Abbildung 6) bieten die Möglichkeit, das natürliche Blickverhalten in einer vom Computermonitor losgelösten Umgebung zu erfassen. Mobile Eye-Tracking-Brillen sind bereits im bildungswissenschaftlichen Kontext erfolgreich eingesetzt worden, um z. B. das unterschiedliche Blickverhalten von erfahrenen Lehrkräften und Neulingen im Lehrerberuf im Hinblick auf Unterrichtsgestaltung und -störungen hin zu erfassen (Cortina, Miller, McKenzie & Epstein, 2015; McIntyre, Mainhard & Klassen, 2017; McIntyre, Jarodzka & Klassen, 2017). In den in dieser Arbeit präsentierten Studien wird erstmals eine Eye-Tracking-Brille dazu eingesetzt, Indikatoren von kognitiven Verarbeitungsprozessen von Lernenden bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens auf Papier zu erfassen.

1.4 Struktur und zentrale Forschungsfragen der Arbeit

In den folgenden Kapiteln 2 und 3 werden drei empirische Studien vorgestellt¹⁴, in denen Lernende die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens beim Lernen mit einem naturwissenschaftlichen Text zur Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren auf Papier anwendeten. Abschließend werden die drei Studien in Kapitel 4 zusammenfassend diskutiert.

Das übergreifende primäre Ziel der drei hier präsentierten Studien ist es, die in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen (d. h. der *Generative Theory of Drawing Construction* von van Meter & Garner, 2005, bzw. des *Cognitive Model of Drawing Construction* von van Meter & Firetto, 2013) angenommenen Annahmen zur kognitiven Verarbeitung erstmalig mithilfe von Blickbewegungsanalysen empirisch zu überprüfen. Es wird dabei angenommen, dass durch das Erstellen einer sinnstiftenden Zeichnung Lernende dazu angeregt werden, ihre Aufmerksamkeit gezielt auf die zentralen Aspekte des Textinhaltes zu lenken und dass die dort selektierten deskriptiven Elemente mit der depiktiven Zeichnung integriert werden. Weiterhin wird angenommen, dass das Vorwissen die Selektions- und Integrationsprozesse unterstützt. Da die Erstellung einer Zeichnung nahezu unmöglich ist, wenn Lernende nicht zumindest die wesentlichen Elemente und Zusammenhänge eines Textes erschlossen haben, gewährt der momentane Stand der Zeichnung während des Zeichenprozesses Lernenden eine Rückmeldung über den Lernfortschritt. Durch diese automatisch angeregte Selbstüberwachung nehmen van Meter und Firetto (2013) an, dass Lernende beim Erstellen einer Zeichnung häufiger sinnstiftende Regulationsprozesse ausführen (wie z. B.



Abbildung 8: Beispiel für den Einsatz der Eye-Tracking-Brille bei der Bearbeitung der Lernmaterialien (eigene Abbildungen).

¹⁴ Die Darstellung der Studien basiert auf eingereichten Manuskripten in internationalen Fachzeitschriften. Daher sind Kapitel 2 und 3 in englischer Sprache verfasst.

erneutes Lesen von zentralen Textpassagen oder Verknüpfungsversuche von Bild- und Textinformationen), als Lernende, die nicht zeichnen. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob sich die über die Blickbewegungsanalyse gefundenen Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse des sinnstiftenden Zeichnens von denen anderer generativer Lernstrategien (z. B. das Erstellen von Zusammenfassungen) abgrenzen lassen.

Um die Blickbewegungen von Lernenden bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens mit papierbasiertem Material zu erfassen, kommt in den drei Studien eine Eye-Tracking-Brille der Firma SensoMotoric Instruments zum Einsatz (Modell: SMI ETG 1.5; siehe Abbildung 6). Die Eye-Tracking-Brille erlaubt es den Probanden, ihre bevorzugte Sitzposition beim Lernen einzunehmen und ihre Kopf- und Körperhaltung während des Lernens frei zu verändern, was einen Vorteil gegenüber stationären Eye-Trackern darstellt, bei denen die Probanden relativ still in einer festen Sitzposition vor einem Computermonitor sitzen müssen. Weiterhin ermöglicht es die mobile Eye-Tracking-Brille, das universitäre Laborsetting zu verlassen und so auch verhaltensnahe Untersuchungen in der Schule durchzuführen.

In den beiden Studien, die im zweiten Kapitel vorgestellt werden, wurden daher Schülerinnen und Schüler von achten bzw. neunten Klassen verschiedener Gymnasien in Nordrhein-Westfalen in den jeweiligen Schulen im Hinblick auf ihr Lernverhalten untersucht. Das Ziel der ersten Studie ist es, über die Blickbewegungsmuster der Lernenden Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse des Selektierens und Integrierens während der Anwendung des sinnstiftenden Zeichnens auszumachen. Zum Vergleich werden dazu die Blickbewegungen und die Ergebnisse aus Lernerfolgstests von Lernenden herangezogen, die mit klassischem multimedialen Lernmaterial in Form von einem Text und vorgegebenen Abbildungen lernen. Weiterhin wird in dieser Studie im Hinblick auf das *prognostic drawing principle* untersucht, ob die Qualität der erstellten Zeichnungen den Lernerfolg voraussagen kann. Dabei werden das von Schmeck et al. (2014) entwickelte Lernmaterial zur Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren sowie adaptierte Versionen des Vorwissenstests und der Lernerfolgstests verwendet, mit welchen Schmeck et al. (2014) schon zeigen konnten, dass Lernende mit Zeicheninstruktion ein höheres Textverständnis erwarben als Lernende, die nur den Text lasen und vorgegebene Abbildungen zum Text erhielten.

Dementsprechend lauten die Forschungsfragen für die erste Studie:

1. Inwiefern unterscheiden sich Lernende, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von Lernenden, welche vorgegebene Abbildungen zu einem Text erhalten, im Hinblick auf den Lernerfolg?
2. Inwiefern prognostiziert die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen den Lernerfolg der Lernenden, welche die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden?
3. Inwiefern unterscheiden sich die Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von denen der Lernenden, die vorgegebene Abbildungen zu einem Text erhalten?

Abbildungen, welche die wesentlichen Informationen eines Textes beinhalten, können als einfach zugängliche externe Repräsentationen für selektive Verarbeitung dienen und können daher sehr hilfreich bei der Konstruktion eines mentalen Modells sein (Hochpöchler et al., 2013; Schnotz, 2014; Schnotz et al., 2014). Andererseits betrachten Lernende Abbildungen oft nur oberflächlich und / oder haben Schwierigkeiten, diese zu interpretieren (z. B. Brandstetter et al., 2017; Kragten, Admiraal & Rijlaarsdam, 2013, 2015). Es wird daher erwartet, dass Lernende mit Zeicheninstruktion besser in den eingesetzten Lernerfolgstests abschneiden als Lernende, die zum Text vorgegebene Abbildungen erhalten. Weiterhin wird erwartet, dass Lernende mit Zeicheninstruktion gemäß den Annahmen des CMDC stärker ihre Aufmerksamkeit auf die zentralen Textstellen richten und mehr sinnstiftende Integrationsversuche zwischen diesen Textstellen und der Zeichnung unternehmen. Im Hinblick auf das *prognostic drawing principle* wird erwartet, dass die Qualität der erstellten Zeichnungen den Lernerfolg voraussagt.

In der zweiten Studie steht die Frage im Vordergrund, ob die in der ersten Studie gefundenen Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse für das sinnstiftende Zeichnen typisch bzw. einzigartig sind, sodass sie sich von denen anderer generativen Lernstrategien, wie z. B. der Strategie des Zusammenfassens, abgrenzen lassen. Weiterhin soll die Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens gegenüber der Wirksamkeit der Lernstrategie des Zusammenfassens untersucht werden. Schließlich wird als sekundäres Ziel im Hinblick auf das *prognostic drawing principle* untersucht, ob die Qualität

der erstellten Zeichnungen den Lernerfolg voraussagen kann. In der zweiten Studie werden die gleichen Lernmaterialien und Tests verwendet wie in der ersten Studie.

Dementsprechend lauten die Forschungsfragen für die zweite Studie:

1. Inwiefern entsprechen die Lernleistungen der Lernenden mit Zeicheninstruktion aus Studie 2 den Lernleistungen der Lernenden mit Zeicheninstruktion aus Studie 1?
2. Inwiefern unterscheiden sich Lernende, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von Lernenden, welche Zusammenfassungen zu einem Text erstellen, im Hinblick auf den Lernerfolg?
3. Inwiefern prognostiziert die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen den Lernerfolg der Lernenden, welche die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden?
4. Inwiefern lassen sich die Blickbewegungsmuster der Lernenden mit Zeicheninstruktion aus Studie 1 in Studie 2 replizieren?
5. Inwiefern unterscheiden sich die Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von denen der Lernenden, die Zusammenfassungen zu einem Text erstellen?

Es wird erwartet, dass sich sowohl die Leistungen in den Lernerfolgstests als auch die in der ersten Studie für Lernende mit Zeicheninstruktion gefundenen Blickbewegungsmuster in der zweiten Studie replizieren lassen. In Anlehnung an die Ergebnisse von Leopold und Leutner (2012) wird weiterhin erwartet, dass Lernende mit Zeicheninstruktion besser in den Lernerfolgstests abschneiden als Lernende, die eine Instruktion zum Zusammenfassen erhalten. Die Lernstrategie des Zusammenfassens fördert ebenfalls die sinnstiftenden kognitiven Verarbeitungsprozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens. Wie bei der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens müssen Lernende relevante Informationen aus dem Text auswählen, in prägnanten mentalen Repräsentationen organisieren und mit dem eigenen Vorwissen integrieren, sodass schließlich eine Zusammenfassung des Textinhalts in eigenen Worten erfolgen kann (Fiorella & Mayer, 2015; Kintsch & van Dijk, 1978; Kintsch, 1990). Bei der Strategie des Zusammenfassens erfolgt die textbasierte Verarbeitung eher linear (z. B. Larkin & Simon, 1987), wohingegen die Modelle zum sinnstiftenden Zeichnen annehmen, dass die Textverarbeitung rekursiv erfolgt (siehe Kapitel 1.2.2). Dementsprechend wird erwartet, dass sich die Blickbewegungsmuster von Lernenden mit Zeicheninstruktion von

denen Lernender mit Zusammenfassungsinstruktion abgrenzen lassen. Lernende mit Zeicheninstruktion sollten entsprechend ihre Aufmerksamkeit stärker auf die zentralen Textstellen richten und mehr sinnstiftende Integrationsversuche zwischen diesen Textstellen und der Zeichnung unternehmen als Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion. Im Hinblick auf das *prognostic drawing principle* wird wieder erwartet, dass die Qualität der erstellten Zeichnungen den Lernerfolg voraussagt.

Im dritten Kapitel wird eine Studie vorgestellt, in welcher die Blickbewegungen und Verhaltensspuren von solchen Lernenden bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens analysiert werden, welche hohes bzw. geringes Vorwissen zur Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren besitzen. Bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens nimmt das Vorwissen eine besondere Rolle ein, da es sich sowohl auf die angenommene propositionale Repräsentation als auch auf die Konstruktion des mentalen Modells auswirkt. Damit hat das Vorwissen einen entscheidenden Einfluss darauf, welche Elemente für die Weiterverarbeitung im Arbeitsgedächtnis ausgewählt werden (siehe Kapitel 1.2.2). Daher stehen in der dritten Studie die Fragen im Vordergrund, ob Unterschiede in der Qualität der während des Lernens zu erstellenden Zeichnungen, Unterschiede im Lernerfolg und Unterschiede im Blickverhalten der Lernenden mit hohem und geringem Vorwissen Rückschlüsse auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse und damit auf die Ausprägung der jeweiligen mentalen Modelle zulassen. Ein sekundäres Ziel der Studie ist es, ob die Qualität der erstellten Zeichnungen dabei wiederum den Lernerfolg voraussagt und somit ein weiterer Beleg für das *prognostic drawing principle* gefunden werden kann. Es kommen das gleiche Lernmaterial sowie die gleichen Tests zum Einsatz wie in den vorherigen Studien.

Zusammengefasst lauten die Forschungsfragen der dritten Studie:

1. Inwiefern unterscheiden sich Lernende mit hohem und geringem Vorwissen bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens in der Qualität der angefertigten Zeichnungen und im Lernerfolg?
2. Inwiefern prognostiziert die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen den Lernerfolg der Lernenden?

3. Inwiefern unterscheiden sich die Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden mit hohem Vorwissen von denen der Lernenden mit geringem Vorwissen während der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens?

Generell wird von Lernenden mit hohem Vorwissen angenommen, dass sie über mehr domänenspezifisches Wissen und komplexere kognitive Schemata verfügen als Lernende mit geringem Vorwissen, sodass sie dementsprechend deutlich abstraktere mentale Modelle entwickeln (z. B. Braune & Foshay, 1983; Cook et al., 2008; Snyder, 2000). Weiterhin wird von Lernenden mit hohem Vorwissen angenommen, dass sie besser wichtige von unwichtigen Informationen für den Lernprozess trennen können und insbesondere beim Lernen mit multimedialen Lerninhalten Eigenschaften und Zusammenhänge ausmachen, die Lernende mit geringem Vorwissen übersehen würden (z. B. Canham & Hegarty, 2010; Chi, 2006). Dementsprechend wird erwartet, dass Lernende mit hohem Vorwissen sowohl qualitativ bessere Zeichnungen während des Lernens erstellen als auch besser in Lernerfolgstests abschneiden als Lernende mit geringem Vorwissen. Weiterhin wird angenommen, dass Lernende mit hohem Vorwissen ihre Aufmerksamkeit stärker auf die zentralen relevanten Textstellen richten und mehr sinnstiftende Integrationsversuche zwischen diesen Textstellen und der Zeichnung unternehmen als Lernende mit geringem Vorwissen.

Im vierten und letzten Kapitel dieser Arbeit werden abschließend die Ergebnisse der drei Studien zusammenfassend diskutiert. Hierbei erfolgt zunächst eine Zusammenfassung der zentralen empirischen Ergebnisse der drei Studien, auf welche eine Diskussion möglicher theoretischer und praktischer Implikationen sowie zukünftiger Forschungsfragen anschließt.

1.5 Literaturverzeichnis

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33 (2-3), 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9)
- Ainsworth, S. (2006). DeFT. A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16 (3), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Ainsworth, S. (2010). Improving learning by drawing. In S. Goldman, J. Pellegrino, K. Gomez, L. Lyons & J. Radinsky (Hrsg.), *Learning in the disciplines. Proceedings of the 9th international conference of the learning sciences* (Bd. 2, S. 167–168). Chicago, IL: International Society of the Learning Sciences.
- Ainsworth, S. (2014). The multiple representation principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 464–486). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.024>
- Ainsworth, S., Bibby, P. & Wood, D. (2002). Examining the effects of different multiple representational systems in learning primary mathematics. *Journal of the Learning Sciences*, 11 (1), 25–62.
- Ainsworth, S., Prain, V. & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333 (6046), 1096–1097. <https://doi.org/10.1126/science.1204153>
- Ainsworth, S., Wood, D. J. & Bibby, P. (1998). Analysing the costs and benefits of multi-representational learning environments. In M. W. van Someren, H. P. A. Boshuizen, T. de Jong & P. Reimann (Hrsg.), *Learning with multiple representations* (S. 120–134). Oxford: Elsevier Science.
- Alesandrini, K. L. (1981). Pictorial-verbal and analytic-holistic learning strategies in science learning. *Journal of Educational Psychology*, 73 (3), 358–368.
- Alesandrini, K. L. (1984). Pictures and adult learning. *Instructional Science*, 13, 63–77.
- Artelt, C., McElvany, N., Christmann, U., Richter, T., Groeben, N., Köster, J. et al. (2007). *Förderung von Lesekompetenz – Expertise*. Bonn, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- Artelt, C., Schneider, W. & Schiefele, U. (2002). Ländervergleich zur Lesekompetenz. In J. Baumert, C. Artelt, E. Klieme, M. Neubrand, M. Prenzel, U. Schiefele et al. (Hrsg.), *PISA 2000 — Die Länder der Bundesrepublik Deutschland im Vergleich* (S. 55–94). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-663-11042-2_3

- Ayres, P. & Sweller, J. (2014). The split-attention principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 206–226). Cambridge: Cambridge University Press.
- Azevedo, R. & Aleven, V. (Hrsg.). (2013). *International handbook of metacognition and learning technologies* (Springer International Handbooks of Education, Bd. 28). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3>
- Azevedo, R., Cromley, J. G. & Seibert, D. (2004). Does adaptive scaffolding facilitate students' ability to regulate their learning with hypermedia? *Contemporary Educational Psychology*, 29 (3), 344–370. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2003.09.002>
- Baddeley, A. D. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556–559.
- Baddeley, A. D. (1999). *Essentials of human memory* (Cognitive psychology). Hove: Psychology Press.
- Baddeley, A. D. (2012). Working memory. Theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1–29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
- Baddeley, A. D., Eysenck, M. W. & Anderson, M. C. (2009). *Memory*. Hove: Psychology Press.
- Bodemer, D., Ploetzner, R., Feuerlein, I. & Spada, H. (2004). The active integration of information during learning with dynamic and interactive visualisations. *Learning and Instruction*, 14 (3), 325–341. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.06.006>
- Bos, W., Valtin, R., Hußmann, A., Wendt, H. & Goy, M. (2017). IGLU 2016: Wichtige Ergebnisse im Überblick. In A. Hußmann, H. Wendt, W. Bos, A. Bremerich-Vos, D. Kasper, E.-M. Lankes et al. (Hrsg.), *IGLU 2016. Lesekompetenzen von Grundschulkindern in Deutschland im internationalen Vergleich* (1. Aufl., S. 13–28). Münster: Waxmann.
- Boucheix, J.-M. & Lowe, R. K. (2010). An eye tracking comparison of external pointing cues and internal continuous cues in learning with complex animations. *Learning and Instruction*, 20 (2), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.015>
- Brandstetter, M., Sandmann, A. & Florian, C. (2017). Understanding pictorial information in biology. Students' cognitive activities and visual reading strategies. *International Journal of Science Education*, 4 (1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1320454>
- Brandstetter-Korinth, M. (2017). *Abbildungen im Biologieunterricht [Diagrams in biology lessons]* (Biologie lernen und lehren, Bd. 19). Berlin: Logos.

- Braune, R. & Foshay, W. R. (1983). Towards a practical model of cognitive/information processing task analysis and schema acquisition for complex problem-solving situations. *Instructional Science*, 12 (2), 121–145. <https://doi.org/10.1007/BF00122453>
- Brünken, R. & Leutner, D. (2001). Aufmerksamkeitsverteilung oder Aufmerksamkeitsfokussierung? Empirische Ergebnisse zur „Split-Attention-Hypothese“ beim Lernen mit Multimedia. *Unterrichtswissenschaft*, 29 (4), 357–366.
- Brünken, R., Steinbacher, S., Schnotz, W. & Leutner, D. (2001). Mentale Modelle und Effekte der Präsentations- und Abrufkodalität beim Lernen mit Multimedia. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 15 (1), 16–27. <https://doi.org/10.1024//1010-0652.15.1.16>
- Butcher, K. R. (2006). Learning from text with diagrams. Promoting mental model development and inference generation. *Journal of Educational Psychology*, 98 (1), 182–197. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.98.1.182>
- Butcher, K. R. (2014). The multimedia principle. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 174–205). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.010>
- Canham, M. & Hegarty, M. (2010). Effects of knowledge and display design on comprehension of complex graphics. *Learning and Instruction*, 20 (2), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.014>
- Carney, R. N. & Levin, J. R. (2002). Pictorial illustrations still improve students' learning from text. *Educational Psychology Review*, 14 (1), 5–26.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 8 (4), 293–332. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2
- Cheng, M. M. W. & Gilbert, J. K. (2014). Students' visualization of diagrams representing the human circulatory system. The use of spatial isomorphism and representational conventions. *International Journal of Science Education*, 37 (1), 136–161. <https://doi.org/10.1080/09500693.2014.969359>
- Chi, M. T. H. (2006). Two approaches to study of experts' characteristics. In N. Charness & Feltovich, Paul J., Hoffman, Robert R., Ericsson, K. Anders (Hrsg.), *The Cambridge handbook of expertise and expert performance* (S. 21–30). New York, NY: Cambridge University Press.
- Chittleborough, G. & Treagust, D. F. (2008). Correct interpretation of chemical diagrams requires transforming from one level of representation to another. *Research in Science Education*, 38 (4), 463–482. <https://doi.org/10.1007/s11165-007-9059-4>

- Clark, J. M. & Paivio, A. (1991). Dual coding theory and education. *Educational Psychology Review*, 3 (3), 149–210. <https://doi.org/10.1007/BF01320076>
- Cook, M., Carter, G. & Wiebe, E. N. (2008). The interpretation of cellular transport graphics by students with low and high prior knowledge. *International Journal of Science Education*, 30 (2), 239–261. <https://doi.org/10.1080/09500690601187168>
- Cortina, K. S., Miller, K. F., McKenzie, R. & Epstein, A. (2015). Where low and high inference data converge. Validation of CLASS assessment of mathematics instruction using mobile eye tracking with expert and novice teachers. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13 (2), 389–403. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9610-5>
- Cuevas, H. M., Fiore, S. M. & Oser, R. L. (2002). Scaffolding cognitive and metacognitive processes in low verbal ability learners: Use of diagrams in computer-based training environments. *Instructional Science*, 30 (6), 433–464. <https://doi.org/10.1023/A:1020516301541>
- Delabarre, E. B. (1898). A Method of Recording Eye-Movements. *The American Journal of Psychology*, 9 (4), 572–574. <https://doi.org/10.2307/1412191>
- Denzin, N. M. (1970). *The research act in sociology*. Chicago, IL: Aldine.
- Deubel, H. & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition. Evidence for a common attentional mechanism. *Vision research*, 36 (12), 1827–1837. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00294-4)
- Duchowski, A. T. (2017). *Eye tracking methodology. Theory and practice* (3. Aufl.). Cham: Springer.
- Eitel, A. (2016). How repeated studying and testing affects multimedia learning. Evidence for adaptation to task demands. *Learning and Instruction*, 41, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.10.003>
- Eitel, A., Scheiter, K. & Schöler, A. (2013). How inspecting a picture affects processing of text in multimedia learning. *Applied Cognitive Psychology*, 27 (4), 451–461. <https://doi.org/10.1002/acp.2922>
- Eitel, A., Scheiter, K., Schöler, A., Nyström, M. & Holmqvist, K. (2013). How a picture facilitates the process of learning from text. Evidence for scaffolding. *Learning and Instruction*, 28, 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.05.002>
- Fiorella, L. & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity. Eight learning strategies that promote understanding*. New York: Cambridge University Press.

- Gegenfurtner, A., Lehtinen, E., Jarodzka, H. & Säljö, R. (2017). Effects of eye movement modeling examples on adaptive expertise in medical image diagnosis. *Computers & Education*, 113, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.06.001>
- Gegenfurtner, A., Lehtinen, E. & Säljö, R. (2011). Expertise differences in the comprehension of visualizations: A meta-analysis of eye-tracking research in professional domains. *Educational Psychology Review*, 23 (4), 523–552. <https://doi.org/10.1007/s10648-011-9174-7>
- Gobert, J. D. & Clement, J. J. (1999). Effects of student-generated diagrams versus student-generated summaries on conceptual understanding of causal and dynamic knowledge in plate tectonics. *Journal of Research in Science Teaching*, 36 (1), 39. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199901\)36:1<39::AID-TEA4>3.3.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1<39::AID-TEA4>3.3.CO;2-9)
- Graesser, A. C., Hacker, D. J. & Dunlosky, J. (Hrsg.). (2009). *Handbook of metacognition in education* (The educational psychology series). New York: Routledge.
- Graesser, A. C., Millis, K. K. & Zwaan, R. A. (1997). Discourse comprehension. *Annual Review of Psychology*, 48, 163–189. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.48.1.163>
- Grebe, W. (1982). *Cato in Latein und Deutsch* (Alte Kölner Volksbücher um 1500, Bd. 4). Köln: Wienand.
- Greene, T. R. (1989). Children's understanding of class inclusion hierarchies. The relationship between external representation and task performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48 (1), 62–89. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(89\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0022-0965(89)90041-6)
- Grossen, B. & Carnine, D. (1990). Diagramming a logic strategy: Effects on difficult problem types and transfer. *Learning Disability Quarterly* (13), 168–182.
- Hall, V. C., Bailey, J. & Tillman, C. (1997). Can student-generated illustrations be worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 89 (4), 677–681. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.4.677>
- Hannus, M. & Hyönä, J. (1999). Utilization of illustrations during learning of science textbook passages among low- and high-ability children. *Contemporary Educational Psychology*, 24 (2), 95–123. <https://doi.org/10.1006/ceps.1998.0987>
- Harp, S. F. & Mayer, R. E. (1997). The role of interest in learning from scientific text and illustrations. On the distinction between emotional interest and cognitive interest. *Journal of Educational Psychology*, 89 (1), 92–102. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.1.92>

- Hegarty, M. & Just, M. A. (1993). Constructing mental models of machines from text and diagrams. *Journal of Memory and Language*, 32 (6), 717–742.
<https://doi.org/10.1006/jmla.1993.1036>
- Hegarty, M., Mayer, R. E. & Green, C. E. (1992). Comprehension of arithmetic word problems. Evidence from students' eye fixations. *Journal of Educational Psychology*, 84 (1), 76–84. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.1.76>
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (11), 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.006>
- Herrlinger, S., Höffler, T. N., Opfermann, M. & Leutner, D. (2017). When do pictures help learning from expository text? Multimedia and modality effects in primary schools. *Research in Science Education*, 47 (3), 685–704. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9525-y>
- Hochpöchler, U., Schnotz, W., Rasch, T., Ullrich, M., Horz, H., McElvany, N. et al. (2013). Dynamics of mental model construction from text and graphics. *European Journal of Psychology of Education*, 28 (4), 1105–1126. <https://doi.org/10.1007/s10212-012-0156-z>
- Höffler, T. N. (2007). *Lernen mit dynamischen Visualisierungen: Metaanalyse und experimentelle Untersuchungen zu einem naturwissenschaftlichen Lerninhalt*. Dissertation, University of Duisburg-Essen. Essen. Verfügbar unter <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet?id=17366>
- Höffler, T. N. & Leutner, D. (2007). Instructional animation versus static pictures. A meta-analysis. *Learning and Instruction*, 17 (6), 722–738. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2007.09.013>
- Hoffman, J. E. & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 57 (6), 787–795.
<https://doi.org/10.3758/BF03206794>
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & van de Weijer, Joost. (2011). *Eye tracking. A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press.
- Holsanova, J. (2008). *Discourse, vision, and cognition* (Human cognitive processing, Bd. 23). Amsterdam: Benjamins.
- Holsanova, J., Holmberg, N. & Holmqvist, K. (2008). Reading information graphics. The role of spatial contiguity and dual attentional guidance. *Applied Cognitive Psychology*, 23 (9), 1215–1226. <https://doi.org/10.1002/acp.1525>

- Hußmann, A., Wendt, H., Bos, W., Bremerich-Vos, A., Kasper, D., Lankes, E.-M. et al. (Hrsg.). (2017). *IGLU 2016. Lesekompetenzen von Grundschulkindern in Deutschland im internationalen Vergleich* (1. Aufl.). Münster: Waxmann.
- Hyrskykari, A., Ovaska, S., Majaranta, P., Räihä, K.-J. & Lehtinen, M. (2008). Gaze path stimulation in retrospective think-aloud. *Journal of Eye Movement Research*, 2 (4), 1–18.
- Jacob, R. J. & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In J. Hyönä, R. Radach & H. Deubel (Hrsg.), *The mind's eye. Cognitive and applied aspects of eye movement research* (S. 573–605). Amsterdam: North-Holland.
- Jarodzka, H. (2010). *In the eye of an expert. Conveying perceptual skills in biological and medical domains via eye movement modeling examples*. Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen. Tübingen, Germany. Verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10900/49546>
- Jarodzka, H., Holmqvist, K. & Gruber, H. (2017). Eye tracking in educational science. Theoretical frameworks and research agendas. *Journal of Eye Movement Research*, 10 (1), 1–18.
- Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P. & van Gog, T. (2010). In the eyes of the beholder. How experts and novices interpret dynamic stimuli. *Learning and Instruction*, 20 (2), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.019>
- Jarodzka, H., van Gog, T., Dorr, M., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2013). Learning to see: Guiding students' attention via a Model's eye movements fosters learning. *Learning and Instruction*, 25, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.11.004>
- Johnson, C. I. & Mayer, R. E. (2012). An eye movement analysis of the spatial contiguity effect in multimedia learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18 (2), 178–191. <https://doi.org/10.1037/a0026923>
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8 (4), 441–480. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3)
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading. From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87 (4), 329–354. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.4.329>
- Kalyuga, S. (2014). The expertise reversal principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 576–597).

- Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.028>
- Kalyuga, S. & Sweller, J. (2014). The redundancy principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 247–262). Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.013>
- Kintsch, E. (1990). Macroprocesses and microprocesses in the development of summarization skill. *Cognitive and Instruction*, 7 (3), 161–195.
https://doi.org/10.1207/s1532690xci0703_1
- Kintsch, E. & Kintsch, W. (1996). Learning from Text. In E. d. Corte & F. E. Weinert (Hrsg.), *International encyclopedia of developmental and instructional psychology* (S. 519–524). Oxford: Pergamon.
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension. A paradigm for cognition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kintsch, W. & van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85 (5), 363–394. <https://doi.org/10.1037//0033-295X.85.5.363>
- Klauer, K. J. & Leutner, D. (2012). *Lehren und Lernen. Einführung in die Instruktionspsychologie* (Psychologie 2012, 2. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- Koning, B. B. de, Tabbers, H. K., Rikers, R. M.J.P. & Paas, F. G. (2010). Attention guidance in learning from a complex animation. Seeing is understanding? *Learning and Instruction*, 20 (2), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.010>
- Kosslyn, S. M. (1999). *Image and brain. The resolution of the imagery debate* (4. Aufl.). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B. A. & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision research*, 35 (13), 1897–1916.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)00279-U](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)00279-U)
- Kozma, R. B. & Russell, J. (1997). Multimedia and understanding. Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34 (9), 949–968. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199711\)34:9<949::AID-TEA7>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199711)34:9<949::AID-TEA7>3.0.CO;2-U)
- Kragten, M., Admiraal, W. & Rijlaarsdam, G. (2013). Diagrammatic literacy in secondary science education. *Research in Science Education*, 43 (5), 1785–1800.
<https://doi.org/10.1007/s11165-012-9331-0>

- Kragten, M., Admiraal, W. & Rijlaarsdam, G. (2015). Students' Learning Activities While Studying Biological Process Diagrams. *International Journal of Science Education*, 37 (12), 1915–1937. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1057775>
- Krejtz, K., Duchowski, A. T., Krejtz, I., Kopacz, A. & Chrzastowski-Wachtel, P. (2016). Gaze transitions when learning with multimedia. *Journal of Eye Movement Research*, 9 (1), 1–17. <https://doi.org/10.16910/jemr.9.1.5>
- Kühl, T., Stebner, F., Navratil, S. C., Fehringer, B. C. O. F. & Münzer, S. (2017). Text information and spatial abilities in learning with different visualizations formats. *Journal of Educational Psychology*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1037/edu0000226>
- Larkin, J. H. & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11 (1), 65–100. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6708.1987.tb00863.x>
- Leigh, R. J. & Zee, D. S. (2015). *The neurology of eye movements* (Contemporary neurology series, Bd. 90, 5. Aufl.). Oxford: Oxford University Press.
- Leisen, J. (2011). Sprachsensibler Fachunterricht. Ein Ansatz zur Sprachförderung im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. In S. Prediger & E. Özdi (Hrsg.), *Mathematiklernen unter Bedingungen der Mehrsprachigkeit. Stand und Perspektiven der Forschung und Entwicklung in Deutschland* (Mehrsprachigkeit, Bd. 32, S. 143–162). Münster: Waxmann.
- Leopold, C. (2009). *Lernstrategien und Textverstehen. Spontaner Einsatz und Förderung von Lernstrategien* (Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie, Bd. 76). Münster: Waxmann.
- Leopold, C. & Leutner, D. (2012). Science text comprehension: Drawing, main idea selection, and summarizing as learning strategies. *Learning and Instruction*, 22 (1), 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.05.005>
- Leopold, C. & Leutner, D. (2015). Improving students' science text comprehension through metacognitive self-regulation when applying learning strategies. *Metacognition and Learning*, 10, 313–346. <https://doi.org/10.1007/s11409-014-9130-2>
- Leopold, C., Sumfleth, E. & Leutner, D. (2013). Learning with summaries. Effects of representation mode and type of learning activity on comprehension and transfer. *Learning and Instruction*, 27, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.003>

- Lesgold, A. M., Good, H. de & Levin, J. R. (1977). Pictures and young children's prose learning: A supplementary report. *Journal of Literacy Research*, 9 (4), 353–360.
<https://doi.org/10.1080/10862967709547240>
- Lesgold, A. M., Levin, J. R., Shimron, J. & Guttman, J. (1975). Pictures and young children's learning from oral prose. *Journal of Educational Psychology*, 67 (5), 636–642.
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.67.5.636>
- Leutner, D., Leopold, C. & Sumfleth, E. (2009). Cognitive load and science text comprehension: Effects of drawing and mentally imagining text content. *Computers in Human Behavior*, 25 (2), 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.12.010>
- Leutner, D. & Opfermann, M. (2013). Selbstreguliertes Lernen mit Texten und Bildern im naturwissenschaftlichen Unterricht [Self-regulated learning with texts and pictures in science instruction]. In H. E. Fischer & E. Sumfleth (Hrsg.), *nwu-essen. 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 100, S. 209–249). Berlin: Logos.
- Leutner, D., Opfermann, M. & Schmeck, A. (2014). Lernen mit Medien. In T. Seidel & A. Krapp (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (6. Aufl., S. 297–322). Weinheim: Beltz.
- Leutner, D. & Schmeck, A. (2014). The generative drawing principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 433–448). Cambridge: Cambridge University Press.
- Levie, W. H. & Lentz, R. (1982). Effects of text illustrations. A review of Research. *Educational Communications and Technology Journal*, 30, 195–323.
- Low, R. & Sweller, J. (2014). The modality principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 227–246). Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.012>
- Lowe, R. K. (1996). Background knowledge and the construction of a situational representation from a diagram. *European Journal of Psychology of Education*, 11, 377–397.
- Mason, L., Lowe, R. K. & Tornatora, M. C. (2013). Self-generated drawings for supporting comprehension of a complex animation. *Contemporary Educational Psychology*, 38 (3), 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2013.04.001>
- Mason, L., Pluchino, P. & Tornatora, M. C. (2015). Eye-movement modeling of integrative reading of an illustrated text. Effects on processing and learning. *Contemporary Educational Psychology*, 41, 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2015.01.004>

- Mason, L., Pluchino, P., Tornatora, M. C. & Ariasi, N. (2013). An Eye-Tracking Study of Learning From Science Text With Concrete and Abstract Illustrations. *The Journal of Experimental Education*, 81 (3), 356–384.
<https://doi.org/10.1080/00220973.2012.727885>
- Mayer, R. E. (1989). Systematic thinking fostered by illustrations in scientific text. *Journal of Educational Psychology*, 81 (2), 240–246. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.81.2.240>
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Mayer, R. E. (2003). The promise of multimedia learning. Using the same instructional design methods across different media. *Learning and Instruction*, 13 (2), 125–139.
[https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00016-6)
- Mayer, R. E. (2008). *Learning and instruction* (2. Aufl.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Merrill Prentice Hall.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2. Aufl.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2014a). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 43–71). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2014b). Introduction to multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 1–24). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.002>
- Mayer, R. E. (Hrsg.). (2014c). *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>
- Mayer, R. E. & Alexander, P. A. (Hrsg.). (2017). *Handbook of research on learning and instruction* (Educational psychology handbook series, 2. Aufl.). New York, NY: Routledge.
- Mayer, R. E. & Anderson, R. B. (1991). Animations need narrations. An experimental test of a dual-coding hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 83 (4), 484–490.
<https://doi.org/10.1037//0022-0663.83.4.484>
- Mayer, R. E. & Anderson, R. B. (1992). The instructive animation. Helping students build connections between words and pictures in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 84 (4), 444–452. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.444>

- Mayer, R. E. & Gallini, J. K. (1990). When is an illustration worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 82 (4), 715–726. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.82.4.715>
- Mayer, R. E. & Moreno, R. (2002). Animation as an aid to multimedia learning. *Educational Psychology Review*, 14 (1), 87–99. <https://doi.org/10.1023/A:1013184611077>
- Mayer, R. E., Steinhoff, K., Bower, G. & Mars, R. (1995). A generative theory of textbook design. Using annotated illustrations to foster meaningful learning of science text. *Educational Technology Research and Development*, 43 (1), 31–41. <https://doi.org/10.1007/BF02300480>
- McIntyre, N. A., Jarodzka, H. & Klassen, R. M. (2017). Capturing teacher priorities. Using real-world eye-tracking to investigate expert teacher priorities across two cultures. *Learning and Instruction*. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.003>
- McIntyre, N. A., Mainhard, M. T. & Klassen, R. M. (2017). Are you looking to teach? Cultural, temporal and dynamic insights into expert teacher gaze. *Learning and Instruction*, 49, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.12.005>
- McNamara, D. S. (Hrsg.). (2007). *Reading comprehension strategies. Theories, interventions, and technologies*. New York: Lawrence Erlbaum Associates.
- McNamara, D. S. & Kintsch, W. (1996). Learning from texts. Effects of prior knowledge and text coherence. *Discourse Processes*, 22 (3), 247–288. <https://doi.org/10.1080/01638539609544975>
- Meyer, K., Rasch, T. & Schnotz, W. (2010). Effects of animation's speed of presentation on perceptual processing and learning. *Learning and Instruction*, 20 (2), 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.016>
- Moreno, R. (2006). Does the modality principle hold for different media? A test of the method-affects-learning hypothesis. *Journal of Computer Assisted Learning*, 22 (3), 149–158. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2006.00170.x>
- Moreno, R. & Mayer, R. E. (1999). Cognitive principles of multimedia learning. The role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology*, 91 (2), 358–368. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.91.2.358>
- Nelson, T. O. & Narens, L. (1990). Metamemory: A theoretical framework and some new findings. In G. H. Bower (Hrsg.), *The Psychology of Learning and Motivation* (S. 125–173). New York: Academic Press.
- Nitz, S. (2012). *Fachsprache im Biologieunterricht: Eine Untersuchung zu Bedingungsfaktoren und Auswirkungen*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Kiel.

- Nuthmann, A., Engbert, R. & Kliegl, R. (2006). Messung von Blickbewegungen. In J. Funke & J. Bengel (Hrsg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition* (Handbuch der Psychologie, Bd. 5, S. 705–711). Göttingen: Hogrefe.
- Ögren, M., Nyström, M. & Jarodzka, H. (2017). There's more to the multimedia effect than meets the eye. Is seeing pictures believing? *Instructional Science*, 45 (2), 263–287. <https://doi.org/10.1007/s11251-016-9397-6>
- Opfermann, M., Schmeck, A. & Fischer, H. E. (2017). Multiple Representations in Physics and Science Education – Why Should We Use Them? In D. F. Treagust, R. Duit & H. E. Fischer (Hrsg.), *Multiple Representations in Physics Education* (Models and Modeling in Science Education, Bd. 10, S. 1–22). Cham: Springer International Publishing.
- Paas, F. G. & Sweller, J. (2014). Implications of cognitive load theory for multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 27–42). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.004>
- Paivio, A. (1986). *Mental representations. A dual coding approach*. Oxford: Oxford University Press.
- Paivio, A. (2006). *Mind and its evolution. A dual coding theoretical approach*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Plass, J. L., Chun, D. M., Mayer, R. E. & Leutner, D. (1998). Supporting visual and verbal learning preferences in a second-language multimedia learning environment. *Journal of Educational Psychology*, 90 (1), 25–36. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.90.1.25>
- Radach, R., Günther, T. & Huestegge, L. (2012). Blickbewegungen beim Lesen, Lesentwicklung und Legasthenie. *Lernen und Lernstörungen*, 1 (3), 185–204. <https://doi.org/10.1024/2235-0977/a000019>
- Rasch, T. & Schnotz, W. (2009). Interactive and non-interactive pictures in multimedia learning environments. Effects on learning outcomes and learning efficiency. *Learning and Instruction*, 19 (5), 411–422. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.008>
- Rasco, R., Tennyson, R. D. & Boutwell, R. C. (1975). Imagery instructions and drawings in learning prose. *Journal of Educational Psychology*, 67 (2), 188–192.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing. 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124 (3), 372–422. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>

- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly journal of experimental psychology (2006)*, 62 (8), 1457–1506.
<https://doi.org/10.1080/17470210902816461>
- Rayner, K., McConkie, G. W. & Ehrlich, S. (1978). Eye movements and integrating information across fixations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4 (4), 529–544. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.4.4.529>
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139062367>
- Reingold, E. M. & Sheridan, H. (2011). Eye movements and visual expertise in chess and medicine. In S. P. Liversedge, I. D. Gilchrist & S. Everling (Hrsg.), *The Oxford handbook of eye movements* (S. 523–550). Oxford: Oxford University Press.
- Rellensmann, J., Schukajlow, S. & Leopold, C. (2017). Make a drawing: Effects of strategic knowledge, drawing accuracy, and type of drawing on students' mathematical modelling performance. *Educational Studies in Mathematics*, 95 (1), 53–78.
<https://doi.org/10.1007/s10649-016-9736-1>
- Remington, R. W. (1980). Attention and saccadic eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6 (4), 726–744.
- Rickheit, G. & Schade, U. (2000). Kohärenz und Kohäsion. In K. Brinker, G. Antos, W. Heinemann & S. F. Sager (Hrsg.), *Text- und Gesprächslinguistik: Ein internationales Handbuch zeitgenössischer Forschung [Linguistics of text and conversation : an international handbook of contemporary research]* (Handbücher zur Sprach- und Kommunikationswissenschaft, Bd. 16.1, S. 275–283). Berlin: de Gruyter.
- Rous, M. (2016). *Fachsprache im Biologieunterricht. Förderung von konzeptuellem Lernen und Textverstehen durch fachspezifisch-sprachsensible Aufgaben* (Biologie lernen und lehren, Bd. 16). Berlin: Logos.
- Rummer, R., Schweppe, J., Fürstenberg, A., Seufert, T. & Brünken, R. (2010). Working memory interference during processing texts and pictures. Implications for the explanation of the modality effect. *Applied Cognitive Psychology*, 24 (2), 164–176.
<https://doi.org/10.1002/acp.1546>
- Rummer, R., Schweppe, J., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2008). Lernen mit Multimedia. Die kognitiven Grundlagen des Modalitätseffekts. *Psychologische Rundschau*, 59 (2), 98–107. <https://doi.org/10.1026/0033-3042.59.2.98>

- Sandmann, A. (2014). Lautes Denken – die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179–188). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_15
- Scheiter, K. (2017). Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML). In M. A. Wirtz (Hrsg.), *Dorsch – Lexikon der Psychologie*. Zugriff am 29.12.2017. Verfügbar unter <https://m.portal.hogrefe.com/dorsch/cognitive-theory-of-multimedia-learning-ctml/>
- Scheiter, K., Eitel, A. & Schüler, A. (2016). Lernen mit Texten und Bildern. *Psychologische Rundschau*, 67 (2), 87–93. <https://doi.org/10.1026/0033-3042/a000300>
- Scheiter, K., Schleinschok, K. & Ainsworth, S. (2017). Why sketching may aid Learning from science texts. Contrasting Sketching With Written Explanations. *Topics in cognitive science*, 9 (4), 866–882. <https://doi.org/10.1111/tops.12261>
- Scheiter, K. & van Gog, T. (2009). Using eye tracking in applied research to study and stimulate the processing of information from multi-representational sources. *Applied Cognitive Psychology*, 23 (9), 1209–1214. <https://doi.org/10.1002/acp.1524>
- Schmeck, A. (2010). *Visualisieren naturwissenschaftlicher Sachverhalte. Der Einsatz von vorgegebenen und selbst generierten Visualisierungen als Textverstehenshilfen beim Lernen aus naturwissenschaftlichen Sachtexten [Visualization of science text content: Using provided and learner-generated visualizations as aids for comprehension in learning from science texts]*. Dissertation, University of Duisburg-Essen. Essen. Verfügbar unter http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-25873/Diss_Schmeck.pdf
- Schmeck, A., Mayer, R. E., Opfermann, M., Pfeiffer, V. & Leutner, D. (2014). Drawing pictures during learning from scientific text: Testing the generative drawing effect and the prognostic drawing effect. *Contemporary Educational Psychology*, 39 (4), 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2014.07.003>
- Schmidgall, S. P. (2017). *Drawing to learn. Investigating the role of contributing factors and instructional support for learner-generated drawing*. Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen. Tübingen, Germany. <https://doi.org/10.15496/publikation-18678>
- Schmidt-Weigand, F. (2006). *Dynamic visualizations in multimedia learning: The influence of verbal explanations on visual attention, cognitive load and learning outcome*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen. Gießen. Verfügbar unter <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2006/2699/>

- Schmidt-Weigand, F., Kohnert, A. & Glowalla, U. (2010). A closer look at split visual attention in system- and self-paced instruction in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20 (2), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.011>
- Schnotz, W. (2002). Towards an integrated view of learning from text and visual displays. *Educational Psychology Review*, 14 (1), 101–120. <https://doi.org/10.1023/A:1013136727916>
- Schnotz, W. (2005). An integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 49–70). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.005>
- Schnotz, W. (2014). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 72–103). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>
- Schnotz, W. & Bannert, M. (1999a). Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen [Effects of the visualization form on the construction of mental models in picture and text comprehension]. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, 46 (3), 216–235.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (1999b). Support and interference effects in learning from multiple representations. In S. Bagnara (Hrsg.), *European Conference on Cognitive Science* (S. 447–452). Rome, Italy: Istituto di Psicologia Consiglio, Nazionale delle Ricerche.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13 (2), 141–156. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8)
- Schnotz, W. & Lowe, R. K. (2003). External and internal representations in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 13 (2), 117–123. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00015-4)
- Schnotz, W., Ludewig, U., Ullrich, M., Horz, H., McElvany, N. & Baumert, J. (2014). Strategy shifts during learning from texts and pictures. *Journal of Educational Psychology*, 106 (4), 974–989. <https://doi.org/10.1037/a0037054>
- Schwamborn, A., Mayer, R. E., Thillmann, H., Leopold, C. & Leutner, D. (2010). Drawing as a generative activity and drawing as a prognostic activity. *Journal of Educational Psychology*, 102 (4), 872–879. <https://doi.org/10.1037/a0019640>

- Schwamborn, A., Thillmann, H., Leopold, C., Sumfleth, E. & Leutner, D. (2010). Der Einsatz von vorgegebenen und selbst generierten Bildern als Textverstehenshilfe beim Lernen aus einem naturwissenschaftlichen Sachtext [Using presented and self-generated pictures as learning aids for learning from science text]. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 24 (3), 221–233. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000018>
- Schwamborn, A., Thillmann, H., Opfermann, M. & Leutner, D. (2011). Cognitive load and instructionally supported learning with provided and learner-generated visualizations. *Computers in Human Behavior*, 27 (1), 89–93. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.028>
- Schwonke, R., Berthold, K. & Renkl, A. (2009). How multiple external representations are used and how they can be made more useful. *Applied Cognitive Psychology*, 23 (9), 1227–1243. <https://doi.org/10.1002/acp.1526>
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning and Instruction*, 13 (2), 227–237. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00022-1)
- Seufert, T. & Brünken, R. (2006). Cognitive load and the format of instructional aids for coherence formation. *Applied Cognitive Psychology*, 20 (3), 321–331. <https://doi.org/10.1002/acp.1248>
- Seufert, T., Zander, S. & Brünken, R. (2007). Das Generieren von Bildern als Verstehenshilfe beim Lernen aus Texten. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 39 (1), 33–42. <https://doi.org/10.1026/0049-8637.39.1.33>
- Shavelson, R. J. & Towne, L. (2002). *Scientific research in education*. Washington DC: National Academy Press.
- She, H.-C. & Chen, Y.-Z. (2009). The impact of multimedia effect on science learning. Evidence from eye movements. *Computers & Education*, 53 (4), 1297–1307. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.06.012>
- Shepherd, S. V. & Platt, M. L. (2006). Noninvasive telemetric gaze tracking in freely moving socially housed prosimian primates. *Methods*, 38 (3), 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2005.12.003>
- Snowman, J. & Cunningham, D. J. (1975). A comparison of pictorial and written adjunct aids in learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 67 (2), 307–311. <https://doi.org/10.1037/h0076934>

- Snyder, J. L. (2000). An investigation of the knowledge structures of experts, intermediates and novices in physics. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 979–992.
<https://doi.org/10.1080/095006900416866>
- Stalbovs, K., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2015). Implementation intentions during multimedia learning. Using if-then plans to facilitate cognitive processing. *Learning and Instruction*, 35, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.09.002>
- Stern, E., Aprea, C. & Ebner, H. G. (2003). Improving cross-content transfer in text processing by means of active graphical representation. *Learning and Instruction*, 13 (2), 191–203. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00020-8)
- Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory* (Explorations in the learning sciences, instructional systems and performance technologies). New York: Springer.
- Tirre, W., Manelis, L. & Leicht, K. (1979). The effects of imaginal and verbal strategies on prose comprehension by adults. *Journal of Literacy Research*, 11 (2), 99–106.
<https://doi.org/10.1080/10862967909547313>
- Triesch, J., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M. & Sullivan, B. T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, 3 (1), 86–94. <https://doi.org/10.1167/3.1.9>
- Underwood, G., Chapman, P., Berger, Z. & Crundall, D. (2003). Driving experience, attentional focusing, and the recall of recently inspected events. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 6 (4), 289–304.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2003.09.002>
- Underwood, G., Humphrey, K. & Foulsham, T. (2008). Knowledge-based patterns of remembering: Eye movement scanpaths reflect domain experience. In A. Holzinger (Hrsg.), *HCI and usability for education and work. 4th symposium for the workgroup human-computer interaction and usability engineering of the austrian computer society, USAB 2008, Graz, Austria, November 20-21, 2008 , proceedings* (Lecture Notes in Computer Science, Bd. 5298, S. 125–144). Berlin: Springer.
- Van Dijk, T. A. & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- Van Gog, T. & Jarodzka, H. (2013). Eye tracking as a tool to study and enhance cognitive and metacognitive processes in computer-based learning environments. In R. Azevedo & V. Aleven (Hrsg.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (Springer International Handbooks of Education, Bd. 28, S. 143–156). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3_10

- Van Gog, T., Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P. & Paas, F. G. (2009). Attention guidance during example study via the model's eye movements. *Computers in Human Behavior*, 25 (3), 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2009.02.007>
- Van Gog, T., Paas, F. G., van Merriënboer, J. J. G. & Witte, P. (2005). Uncovering the problem-solving process. Cued retrospective reporting versus concurrent and retrospective reporting. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11 (4), 237–244. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.4.237>
- Van Gog, T. & Scheiter, K. (2010). Eye tracking as a tool to study and enhance multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20 (2), 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.009>
- Van Marlen, T., van Wermeskerken, M., Jarodzka, H. & van Gog, T. (2016). Showing a model's eye movements in examples does not improve learning of problem-solving tasks. *Computers in Human Behavior*, 65, 448–459. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.08.041>
- Van Meter, P. (2001). Drawing construction as a strategy for learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 93 (1), 129–140. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.93.1.129>
- Van Meter, P., Aleksic, M., Schwartz, A. & Garner, J. (2006). Learner-generated drawing as a strategy for learning from content area text. *Contemporary Educational Psychology*, 31 (2), 142–166. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2005.04.001>
- Van Meter, P. & Firetto, C. M. (2013). Cognitive model of drawing construction. Learning through the construction of drawings. In G. J. Schraw, M. T. McCrudden & D. R. Robinson (Hrsg.), *Learning through visual displays* (Current perspectives on cognition, learning, and instruction, S. 247–380). Charlotte, N.C.: Information Age Publishing.
- Van Meter, P. & Garner, J. (2005). The promise and practice of learner-generated drawing: Literature review and synthesis. *Educational Psychology Review*, 17 (4), 285–325. <https://doi.org/10.1007/s10648-005-8136-3>
- Van Meter, P. & Riley, S. (1999). Writing and drawing: What do we gain with different representational formats. In T. Shanahan & F. Rodriguez-Brown (Hrsg.), *47th Yearbook of the National Reading Conference* (S. 146–156). Chicago, IL: National Reading Conference.
- Weinstein, C. E. & Mayer, R. E. (1986). The teaching of learning strategies. In M. C. Wittrock (Hrsg.), *Handbook of research on teaching. A project of the American Educational Research Association* (3. Aufl., S. 315–327). New York, NY: Macmillan Publishers.

- Weis, M., Zehner, F., Sälzer, C., Strohmaier, C. & Pfof, M. (2016). Lesekompetenz in PISA 2015: Ergebnisse, Veränderungen und Perspektiven. In K. Reiss, C. Sälzer, A. Schiepe-Tiska, E. Klieme & O. Köller (Hrsg.), *PISA 2015. Eine Studie zwischen Kontinuität und Innovation* (S. 249–283). Münster: Waxmann.
- Westelinck, K. D., Valcke, M., Craene, B. de & Kirschner, P. (2005). Multimedia learning in social sciences. Limitations of external graphical representations. *Computers in Human Behavior*, 21 (4), 555–573. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2004.10.030>
- Williams, F. J., Mills, D. S. & Guo, K. (2011). Development of a head-mounted, eye-tracking system for dogs. *Journal of neuroscience methods*, 194 (2), 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.10.022>
- Winne, P. H. & Hadwin, A. F. (1998). Studying as self-regulated learning. In D. J. Hacker, J. Dunlosky & A. C. Graesser (Hrsg.), *Metacognition in educational theory and practice* (S. 277–304). Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Winne, P. H. & Perry, N. E. (2000). Measuring self-regulated learning. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich & M. Zeidner (Hrsg.), *Handbook of self-regulation* (S. 531–566). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012109890-2/50045-7>
- Wittrock, M. C. (1974). Learning as a generative process. *Educational Psychologist*, 11, 87–95.
- Wittrock, M. C. (1990). Generative processes of comprehension. *Educational Psychologist*, 24, 345–376.

2 Study I & II: How Generative Drawing Works: An Eye-Tracking Analysis¹⁵

Abstract

Generative drawing is a learning strategy in which students draw illustrations while reading a text to depict the content of the lesson. Previous research shows that generative drawing can be an effective learning strategy that improves performance on tests of learning outcome. The theoretical explanation is that generative drawing prompts learners to engage in deep cognitive processing during learning, but most prior research did not include direct measures of learning processes. To shed more light on the cognitive and metacognitive processes underlying generative drawing, we conducted two experiments, in which we recorded the eye movements of students while they learned with a scientific text. In Experiment 1, students in the drawing group scored higher than students given a text lesson with author-generated illustrations on measures of learning outcomes and had more intentional focus on the text, focused more heavily on relevant content in the text, and engaged more heavily in making connections between visualizations and corresponding text passages. In Experiment 2, students in the drawing group were compared to students who were asked to write a summary. Although the groups showed similar performance in learning outcome measures, they displayed different learning process patterns. The summarizing group display overall more intentional focus on the text, whereas the drawing group displayed more strategically focused processing of the text by focusing more of their attention on relevant text and connections with illustrations. These findings contribute new evidence to guide theories for explaining how generative drawing works as an effective learning strategy.

Keywords: generative drawing, multimedia learning, cognitive and metacognitive processing, eye-tracking, generative learning activities.

¹⁵ Based on a manuscript version of: Hellenbrand, J., Mayer, R. E., Opfermann, M., Schmeck, A., & Leutner, D. (submitted). How generative drawing works: An eye-tracking analysis.

2.1 Theoretical Background

Dealing with a complex scientific text is often a major obstacle for students. In particular, the associated high cognitive and metacognitive demands on working memory can be challenging and might impair deep learning (Baumert et al., 2001; van Dijk & Kintsch, 1983). One way to support students' learning in this situation is to add pictures to the text that depict the main ideas of the text content (*multimedia principle*; Mayer, 2009, 2014). Although the combined use of different forms of representations such as texts and pictures can promote learning, students may have problems in interpreting pictures effectively (e.g., Brandstetter, Sandmann, & Florian, 2017; Cheng & Gilbert, 2014; Kragten, Admiraal, & Rijlaarsdam, 2013, 2015; Seufert, 2003).

Another approach to improve learning that leads to deep level understanding is to encourage students to draw their *own* pictures, which reflect the main ideas of the text (*generative drawing*; Leutner & Schmeck, 2014; van Meter & Firetto, 2013). By asking students to create drawings while reading a scientific text, they are encouraged to engage actively in generative processing such as selecting key elements and relations, organizing them into descriptive and depictive representations, and integrating the mental representations with each other and with prior knowledge into a coherent mental model. Moreover, the cognitive processes required for the drawing task are driven by mechanisms of metacognitive awareness and control, which are automatically triggered by students' efforts to externalize the drawing (van Meter & Firetto, 2013). However, while there is strong evidence that generative drawing (as a self-regulated learning strategy) promotes deeper learning and leads to better learning outcomes than comparable learning strategies (e.g., Leopold & Leutner, 2012; Schmeck, Mayer, Opfermann, Pfeiffer, & Leutner, 2014; van Meter, Aleksic, Schwartz, & Garner, 2006), there is a need for empirical evidence on how drawing affects cognitive processing.

The primary purpose of the following experiments is to identify how students engage in generative cognitive processing while drawing by using mobile eye-tracking technology. Examining eye-movement patterns provides evidence-based indicators of cognitive processing during learning, which helps to clarify the theoretical framework of generative drawing.

What Is the Theoretical Framework Behind Generative Drawing?

According to the *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML; Mayer, 2009, 2014), generative cognitive processing includes three key cognitive processes: *selecting*, which refers to attending to the important material in an instructional message; *organizing*, which refers to arranging incoming information into a coherent cognitive structure; and *integrating*, which refers to mentally connecting verbal and pictorial representations with each other and with relevant knowledge activated from long-term memory.

In order to apply Mayer's theoretical accounts of multimedia learning to drawing, van Meter and Garner (2005) developed the *Generative Theory of Drawing Construction* (GTDC). The GTDC defines drawings as intentionally learner-generated pictorial representations intended to depict represented objects accurately that are described in a text. The GTDC states that when learners are asked to generate external visual representations that represent the main aspects of an instructional text, they are no longer passive consumers of information but actively involved in cognitive processes of selection, organization, and integration. The *Cognitive Model of Drawing Construction* (CMDC; van Meter & Firetto, 2013) is a revised version of the initial GTDC, which retains its basic principles, "namely, the selection and organization of descriptive elements and the forced integration of the descriptive and depictive representations" (van Meter & Firetto, 2013, pp. 255–256), but interprets these processes in terms of self-regulated learning processes.

The CMDC shares structural similarities with Mayer's (2009, 2014) CTML, but is shaped by the theoretical principles described in Schnotz's (2005, 2014; see also Schnotz & Bannert, 2003) *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* (ITPC), in which there is a distinction between descriptive and depictive representations. According to the CMDC, learners form a surface representation by selecting relevant words from the instructional material. The organization of these words and their relations leads to a propositional representation and, by integrating the semantic information with visuo-spatial information and prior knowledge from long-term memory, a depictive coherent mental model is derived. The integration itself "is forced as the verbal representation is the foundation for the nonverbal representation" (van Meter & Garner, 2005, p. 318). The mental model has then to be translated into a perceptual image, which is a depictive surface feature representation that learners can externalize as a drawing on paper. Prior knowledge has a crucial impact on the propositional representation and on mental model construction - for example, when an object to be

drawn is described in the text as concave-shaped, students have to consult their memory in order to determine how the word “concave” can be translated into visual form.

However, generative drawing is not a linear sequence: Learners will undergo many recursions through the steps of the CMDC, driving them back and forth between various internal and external representations in order to generate a drawing (van Meter & Firetto, 2013). To specify these recursive processes in the light of metacognitive awareness, the CMDC incorporates and adapts principles of Winne and Hadwin’s (1998; Winne & Perry, 2000) model of self-regulated learning. Thus, the metacognitive processes of generative drawing are described in the CMDC as a three-phased self-regulation cycle, which involves: “(1) setting standards for performance, (2) applying (strategic) operations, and (3) monitoring goal progress” (van Meter & Firetto, 2013, p. 257).

In order to create a drawing, learners undergo the first phase by setting performance standards and deciding how many details they need to include and how to express relations among different parts. Therefore, the CMDC predicts that by using the drawing strategy, learners’ attention is directed towards key elements and their relations in the text (i.e., the process of selecting). The second phase refers to the cognitive processes of selecting and organizing in order to establish the propositional representation. The CMDC predicts that drawing prompts the usage of other known learning strategies (e.g., self-questioning, rereading) that support the processes of selecting and organizing and therefore facilitate the construction of a propositional network. According to the CMDC the third phase occurs, when learners monitor their progress by comparing their in-progress drawing to the standards set in the first phase, which triggers metacognitive control. If learners are unable to externalize the drawing or have problems representing certain elements and their specific spatial relations in the drawing, the process of integrating pictorial and verbal representations with each other has failed and forward movement is blocked. When this happens, learners know that the learning material might not been understood well enough. In order to fill the missing gaps and to complete the drawing learners are forced to switch back to the text, reread and reselect relevant words, and make new meaningful connections between their work-in-progress drawing and corresponding text passages (forcing function of generative drawing; van Meter & Firetto, 2013). In line with the ITPC, the CMDC assumes that the mental model receives now input from both the perceptual image and the propositional representation. As a consequence of this forcing function, the CMDC predicts that learners who generate drawings on their own engage in these self-monitoring and self-regulation processes more frequently than learners who do not use this strategy.

What Is the Empirical Framework for Generative Drawing?

Over the last 30 years, research on the effectiveness of drawing as a generative learning strategy has shown strong evidence that students who engage in generative drawing learn more deeply from a scientific text than students who, for example, learn only with the text (for an overview see Fiorella & Mayer, 2015; Leutner & Schmeck, 2014). In particular, research shows that generative drawing is more likely to develop its full potential when the drawing process itself is supported, for instance with a legend showing all relevant elements for drawing (cf., Schmeck et al., 2014; Schwamborn, Mayer, Thillmann, Leopold, & Leutner, 2010). Instructional support can reduce extraneous cognitive load that the mechanics of drawing itself induce. Under this boundary condition, Schwamborn et al. (2010; see also Leutner & Schmeck, 2014) proposed the *generative drawing principle*, that is, “people learn better from a science text when they are asked to draw illustrations representing the main ideas of the text” (p. 878).

To clarify that the learning improvement is actually due to learners’ active engagement in drawing activities during reading and not due to the mere application of the multimedia principle, which states that “people learn better from words and pictures than from words alone” (Mayer, 2009, p. 223), Schmeck et al. (2014) conducted an experiment, in which a drawing group was not only compared to a reading only control group, but also to a group who received author-generated pictures to the text. The drawing group performed significantly better on a comprehension posttest than the other groups, which did not differ significantly from each other. Based on the higher learning outcomes of the drawing group the authors concluded that the instruction to draw pictures during reading fosters the engagement in generative activities and is more effective than simply providing pictures to a text.

Another crucial factor for the success of the drawing strategy is how accurately learners generate their drawings. Van Meter and Garner (2005) defined drawing accuracy as “the degree to which completed drawings resemble the represented object(s)” (p. 299). Thus, drawings should be representational pictures (Alesandrini, 1984; Carney & Levin, 2002), rather than artistic expressions. Particularly suitable for creating representational drawings are texts that convey how a scientific system works, such as how the nervous system works (Fiorella & Mayer, 2015). Several studies measured the quality of learners’ drawings with regard to learning outcomes (e.g., Greene, 1989; Hall, Bailey, & Tillman, 1997; Leopold & Leutner, 2015; Lesgold, Good, & Levin, 1977; Lesgold, Levin, Shimron, & Guttman, 1975; Schmeck et al., 2014; Schmidgall, 2017; Schwamborn et al., 2010; van Meter, 2001; van

Meter et al., 2006). Results show that drawing accuracy is positively related to learning outcomes: the higher the drawing accuracy, the higher the score on a learning outcome posttest. Based on these results Schwamborn et al. (2010; see also Leutner & Schmeck, 2014) proposed the *prognostic drawing principle*, that is, “the quality of learners’ drawings during learning predicts the quality of their learning outcomes” (p. 878).

Thus, there is strong support for the generative drawing principle, but there is no research so far on how generative drawing affects specific cognitive processes during learning such as focusing on and selecting relevant information and integrating it. With the steady developments in the field of eye-tracking research, it is now possible to shed some light on these open questions.

Cognitive Processing and Eye Movements

Eye-tracking methodology has proven to have an impact on multimedia research in recent years. Because eye-tracking can reveal insights into ongoing cognitive processes and visual attention during learning, it offers unique contributions to better understand multimedia learning (Hyönä, 2010; Mayer, 2010; van Gog & Scheiter, 2010). Using eye-tracking as a research tool requires the interpretation of the relation between eye movements and cognitive processing. The eye-mind assumption claims a direct relationship between fixations and information being processed: the longer the fixation duration, the more extensive the ongoing cognitive processing (Just & Carpenter, 1976, 1980; Rayner, 1998). Furthermore, there is also evidence that a shift of attention precedes a saccade to the corresponding position and that transitions are associated with integration processes (Deubel & Schneider, 1996; Hoffman & Subramaniam, 1995; Kragten et al., 2015; Mason, Pluchino, Tornatora, & Ariasi, 2013; Rayner, 1998; Rayner, McConkie, & Ehrlich, 1978; Schwonke, Berthold, & Renkl, 2009). Although results of several studies support the hypothesis of a linkage between eye fixation behavior and cognitive processing (e.g., Hannus & Hyönä, 1999; Hegarty & Just, 1993; Hegarty, Mayer, & Green, 1992; Kragten et al., 2015; She & Chen, 2009; Underwood, Humphrey, & Foulsham, 2008), eye-tracking data should always be interpreted with caution: When a learner’s eyes move from a picture to a text, for example, the transition could indicate an attempt to make a connection between the picture and corresponding words, but we do not know if the integration process was actually successful. Thus, using eye-tracking data, the evaluation of the self-generated content, and learning outcome measures in conjunction offers the prospect of enhanced confidence.

However, in recent years, eye-tracking methodology has been used in multimedia research more frequently to examine cognitive processing. Johnson and Mayer (2012), for example, conducted an eye movement analysis of the spatial contiguity effect in multimedia learning. They analyzed transitions between text and diagram (which they refer to as the cognitive process of integrating), and total fixation time on diagram and text (which they refer to as the cognitive process of selecting) as a more direct measure of online cognitive processing in order to clarify theoretical assumptions of the CTML.

Mason et al. (2013) conducted an eye-tracking study to examine how students learn from a science text with concrete or abstract illustrations. Eye-tracking methodology was used to trace text and picture processing. Among other variables, they used fixation duration to measure processing during reading and the frequency of transitions from verbal to graphic representations as indicators of integrative effort. Based on the eye movement analysis they concluded that students who learned with text and abstract illustrations processed the text more efficiently (indicated by fewer fixations on the text, though both groups had almost the same learning gains) and made a greater effort of integrating verbal and pictorial information (indicated by a higher proportion of transitions between the abstract illustration and the text). Ponce and Mayer (2014) examined how highlighting and graphic organizers affect cognitive processing during learning in consideration of fixation durations (indicating attempts to select elements) and transitions (indicating attempts to organize and integrate the graphic organizer with the text). Schnotz et al. (2014) examined the strategies students used for integrating text and picture information. Based on the analysis of participants' number of fixations, fixation durations, and transitions between texts, pictures, and comprehension items they concluded that texts are more likely to be used for coherence-oriented general processing, whereas pictures are more likely to be used as scaffolds for initial mental model construction and afterwards as easily accessible visual representations on demand for specific mental model updates. Kragten et al. (2015) examined students' learning activities while studying biological process diagrams. As an indication for learning activities, they collected verbal data and eye-tracking data, namely fixation durations and transitions between areas of interest in the process diagrams. Both fixation duration and transitions were significant predictors of comprehension scores.

All listed exemplary studies used a computer monitor to present the learning material and a stationary monitor-bound eye-tracker to record participants' eye movements. In the present experiments, we extend eye-tracking methodology to the study of generative drawing on paper while reading a scientific text on paper using mobile eye-tracking glasses.

Overview of the Experiments

Asking learners to create drawings depicting the content of a science text they are reading has been shown to be a promising learning strategy in promoting better learning outcomes (Fiorella & Mayer, 2015; van Meter & Garner, 2005), but there is a need to more directly investigate the cognitive processes underlying learning. According to van Meter and Firetto's (2013) CMDC, two major processes primed by generative drawing are (a) focusing more on the main aspects of the text and (b) mentally integrating related portions of the text rather than processing the text in linear order.

The primary purpose of the following experiments was to examine the theoretical assumptions made in the CMDC by investigating students' learning processes as they read using eye-tracking measures and students' learning outcomes using posttest measures. In particular, we are interested in whether the eye-movement patterns underlying generative drawing can be distinguished from eye-movement patterns of students using other generative instructional or learning strategies. Finally, we examined whether there is further support for the prognostic drawing principle - the idea that the quality of learner-generated drawings is related to their performance on tests of learning outcomes.

For both experiments we adapted the learning materials about an influenza infection and the immune systems' response as well as pre and posttests from Schmeck et al. (2014). In two experiments, Schmeck et al. (2014) have already shown that a drawing group performed significantly better on learning outcome measures than a reading only control group (first and second experiment) and a group provided with author-generated pictures to the text (second experiment). Since the latter two groups of Schmeck et al.'s (2014) second experiment did not differ in learning outcomes, we decided, for our own experiments, to forego a reading only group and, thus, to provide equivalent learning scenarios for our investigation of eye movement behavior. Thus, in Experiment 1 students in the drawing group were compared to students who received author-generated pictures on paper along with the text (as shown in Figure 9). Following the *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* (Schnotz, 2005, 2014) pictures provide a direct route to mental model construction and can serve as easily accessible external representations for task-driven selective processing. On the other hand, several studies have shown that students tend to look at pictures only in a superficial way (e.g., Cheng & Gilbert, 2014; Cook, Carter, & Wiebe, 2008; Kragten et al., 2013, 2015; Seufert, 2003) and that students often have difficulties interpreting the pictures (e.g., Brandstetter et al., 2017; Chittleborough & Treagust, 2008; Schönborn, Anderson, & Grayson,

2002). It is the primary goal of Experiment 1 to distinguish learners' generative processing of drawing their own pictures while reading a text from the generative processing of students learning with a multimedia instruction, that is, printed text and pictures intended to foster learning (Mayer, 2009, 2014).

In Experiment 2, we firstly examined whether the eye-tracking patterns obtained in Experiment 1 can be replicated for the drawing group in Experiment 2. Second, we were interested in whether the eye-movement patterns of students who learn with a drawing task can be distinguished from eye-movement patterns of students who use another generative learning strategy. Compared to generative drawing, a similar generative learning approach that fosters the processes of selecting, organizing, and integrating is learning by summarizing. Analogously to drawing, learners must select relevant information and relations from a text, organize this information into a concise cognitive representation, and integrate it with prior knowledge by restating everything in their own words (Fiorella & Mayer, 2015; Kintsch, 1990; Kintsch & van Dijk, 1978). In contrast to generative drawing, however, learners' attention is drawn to text-based processing - therefore constructing a visual-spatial representation of the text content is not required when summarizing (Leopold & Leutner, 2012). According to Larkin and Simon (1987) text-based processing is sequential in nature, that is, learners who engage in summarizing can be expected to search the text linearly. By contrast, following the CMDC, generative drawing directs learners' attention towards the main aspects of the text in order to relate critical elements to be drawn, identify missing elements, or seek necessary clarification (three-phased self-regulation cycle; van Meter & Firetto, 2013).

Thus, the main research questions in both experiments are the following:

1. Do the groups differ in learning outcomes (as measured by posttests)?
2. For the drawing group in each experiment, does the accuracy of the drawing correlate with posttest scores?
3. Do the groups differ in learning processes (as measured by eye-tracking metrics as indicators of cognitive processing)?

Table 1: Four Eye-Tracking Measures Indicating Cognitive Processing During Learning.

Name	Description	Cognitive process
Rereadings	The total number of fixations inside the text AOIs divided by the total number of words in the text AOIs	Selecting: Attentional focus on words
Focused fixation time	The sum of all fixation durations on important-text AOIs divided by the sum of all fixation durations on text AOIs	Selecting: Proportion of attentional focus on most important content of the text
Transition rate	The total number of workspace-to-text transitions divided by time on task in minutes	Integrating: Attempts to integrate pictures/generated content and text
Meaningful transitions	The total number of workspace-to-important-text transitions divided by the total number of workspace-to-text transitions	Integrating: Proportion of meaningful attempts to integrate pictures/generated content and corresponding text passages

According to the CMDC, we predict that the drawing group will outperform the picture group on learning outcomes and learning process measures in Experiment 1. Further, we expect that the drawing group and summarizing group in Experiment 2 may yield different patterns of performance on the learning outcome posttest and on learning process measures based on eye-tracking (Table 1). Based on previous findings, we expect the “yes” answer for the second research question, which would indicate a replication of the prognostic drawing principle.

In Experiment 2, another main research question is:

4. Does the performance of the drawing group in Experiment 1 correspond to the performance of the drawing group in Experiment 2 on measures of learning outcomes and learning processes?

We expect that both the performance on learning outcome measures and the eye movement patterns obtained in Experiment 1 can be replicated for the drawing group in Experiment 2.

2.2 Experiment 1

The main goal of Experiment 1 was to use eye-tracking methodology to shed more light on the cognitive and metacognitive processing of students who learn by generative drawing as they read a text about influenza infection and the immune systems’ response in comparison to those who read the same text with author-generated pictures. Students were instructed either to draw pictures for each paragraph of a text or to read the text and attend to author-

generated pictures for each paragraph of the text if they needed support. We expected students in the drawing group to perform better than students in the picture group on a learning outcome posttests measuring retention, transfer, and drawing. Furthermore, the quality of students' drawings should also predict learning outcomes. According to the theoretical assumptions of the CMDC, we expected students in the drawing group to reread parts of the text several times, to focus more on the important content of the text, and to switch from their drawing to corresponding text passages more often than students in the picture group.

2.2.1 Method

Participants and design

The participants were 62 eighth and ninth graders in German higher track secondary schools. The data for seven participants were excluded from analyses due to eye-tracking system calibration problems or due to measurement errors and three were removed because they did not follow the instructions. For the analyses that follow, there were 52 participants (19 in eighth grade and 33 in ninth grade) with an average age of 14.08 years ($SD = 0.79$). The proportion of females was 44.2%. There were two groups based on a between-subjects design, with 26 students randomly assigned to the drawing group (who were instructed to draw pictures on paper that reflect the main elements and relations described in the text) and 26 students randomly assigned to the picture group (who received author-generated pictures on paper along with the text and thus served as the control group).

Materials and apparatus

The materials were administered in paper-and-pencil form and consisted of a demographics questionnaire, a content-related knowledge pretest, a spatial and verbal ability test, two learning booklets, a usability questionnaire, and three posttests. The demographics questionnaire solicited basic background information concerning the students' age, sex, and latest grades in science subjects (e.g., biology). The content-related knowledge pretest (based on Schmeck et al., 2014) consisted of 19 multiple-choice items and was intended to assess students' prior knowledge of information covered in the text (Cronbach's $\alpha = .76$). An example item is: "What are the components of an influenza-virus? (a) capsule, membrane, and antibody, (b) capsule, membrane, and glycoproteins, (c) antibody, membrane, and glycoproteins, or (d) nucleus, capsule, and membrane" [(b) is the correct answer]. The content-related knowledge pretest consisted of the same items as the retention posttest and did not include

transfer items, because they are too difficult to answer without prior training in the immunology topic.

To measure students' spatial ability the 10-item Paper Folding Test developed by Ekstrom, French, and Harman (1976) was used (Cronbach's $\alpha = .75$). Students' verbal ability (Cronbach's $\alpha = .62$) was measured with 30 multiple-choice items from the German Cognitive Ability Test (KFT; Heller & Perleth, 2000). Each item presents words that have something in common (stem). Of five alternatives, students have to select the one word that fits to the stem. An example item is: "Mouse, wolf, bear: (a) rose, (b) lion, (c) running, (d) hungry, (e) brewing" [(b) is the correct answer].

There were two versions of the learning booklet - one for each group. They consisted of a motivation questionnaire (which was identical for both groups) and the drawing version or the picture version of the learning material. After the students read the instructions for their particular learning material, but before they engaged in their tasks, students had to fill in a questionnaire addressing their current motivation for doing the learning task (Cronbach's $\alpha = .84$). The questionnaire consisted of nine items from the Challenge and Interest subscale of the Questionnaire on Current Motivation (FAM; Rheinberg, Vollmeyer, & Burns, 2001). The learning material for both groups consisted of a science text that explained the causal steps of an influenza infection and the immune system's response (adapted from Schmeck et al., 2014), which is part of the German biology curriculum for ninth graders in

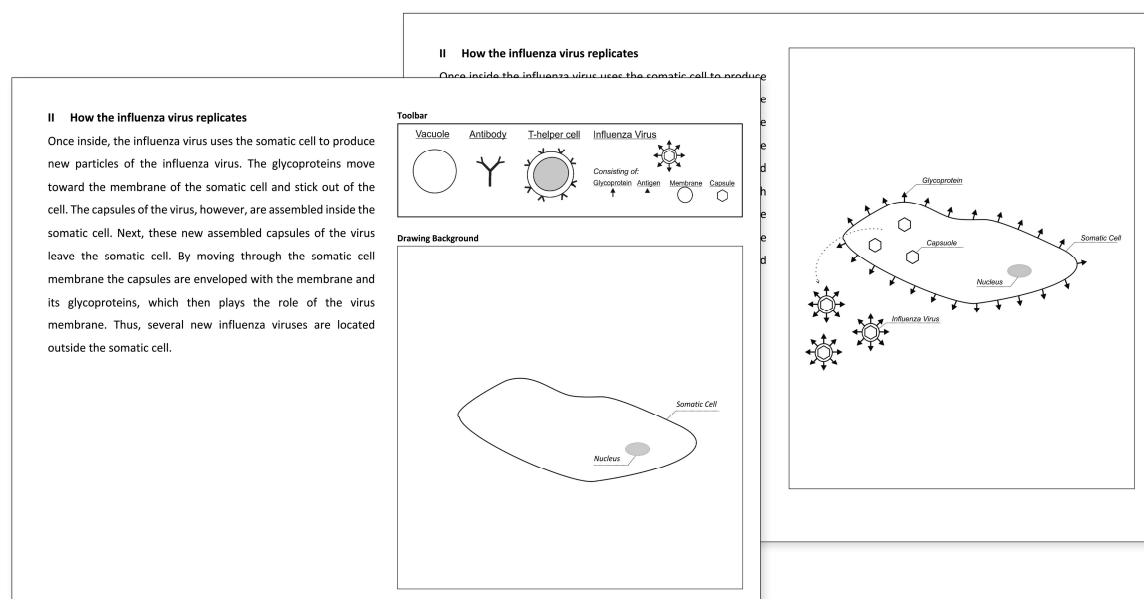


Figure 9: Second text paragraph of the immunology lesson for both groups: Example for text, two-part drawing prompt (left), and author-generated picture (right). Note: Translated from the German original.

higher track secondary schools. The text consisted of 816 words (in German) and was divided into seven paragraphs, which were presented on seven different pages. The second paragraph, translated into English, is shown in Figure 9. For both groups, each paragraph was presented on the left side of a 29.7 x 42.0 cm (DIN A3) sheet of paper. The right side of the paper contained a drawing prompt for the drawing version or contained an author-generated picture for the picture version. The drawing prompt, adapted from Schmeck et al. (2014), included a legend showing all eight elements that were relevant to be included in various drawings (e.g., a template for an influenza virus) and a partly pre-drawn background on which the drawing had to be generated. This level of baseline instructional support was used based on research by Schwamborn et al. (2010), who proposed using a scaffolded drawing prompt to counter overstraining students with the mechanics of drawing itself (see also Leutner, Leopold, & Sumfleth, 2009). Providing a drawing prompt that includes a legend showing all relevant elements for drawing and a pre-drawn background is intended to leave enough cognitive capacity for learners to make sense of the text and benefit from the drawing strategy. The author-generated pictures consisted of the same elements as used in the legend for the drawing condition and each element was labeled. All elements that were shown in the legend or were used for the author-generated pictures as well as their relations were described in detail in the text.

The usability questionnaire developed by the first author assessed whether the eye-tracking glasses affected participants' performance (Cronbach's $\alpha = .75$). Students were asked to rate on a scale from "(1) does not apply" to "(7) does apply" whether the eye-tracking glasses made them move unnaturally, made them feel unwell, and disturbed or restricted them during learning with the text and graphics.

The three posttests intended to assess learning outcomes were a retention posttest, a transfer posttest, and a drawing posttest (based on Schmeck et al., 2014). The retention posttest (Cronbach's $\alpha = .85$) consisted of 19 multiple-choice items (the same items as in the content-related knowledge pretest) and measured students' retention of the factual and conceptual information covered in the text. In addition, the transfer posttest consisted of nine multiple-choice items (Cronbach's $\alpha = .73$) addressing the ability to apply the learned information to new situations. An example item is: "T-helper cells recognize not only viruses, but also agents that are extraneous to the body. Which medication would you administer to a patient, who has received a new kidney? (a) a medicine that suppresses the immune response to the body, (b) a medicine that activates the immune response of the body, (c) a medicine that contains antigens, or (d) a medicine that contains blood of the kidney donor"

[(a) is the correct answer]. The drawing posttest consisted of four items asking students to reproduce the main ideas in the text by drawing sketches depicting key concepts of the text and their spatial relations. An item example for the drawing posttest is: “Sketch the binding between influenza viruses and appropriate antibodies.” The four drawing posttest items are condensed versions of the seven drawings that the students in the drawing group were asked to generate during the learning phase.

The apparatus was an SMI mobile eye-tracking glasses system (SMI ETG 1.5) with a sampling rate of 30 Hz, which was used to record the participants’ eye movements during learning. One advantage of having participants wear mobile eye-tracking glasses (in contrast to sitting at a screen monitored by a stationary eye tracker) is that students could be in their natural sitting position and move their heads freely around while learning. SMI’s BeGaze software (version 3.7) was used for fixation and saccade detection. We also used a drafting table in order to help students handle the big paper format. Another advantage of the drafting table is that the angle between the learning material and participants’ eyes could be optimized in order to reduce measurement errors (Holmqvist et al., 2011).

Procedure

The study took place in two separate sessions. In the first session, students were tested together in their classrooms. First, the experimenter handed out the demographics questionnaire and the content-related knowledge pretest and collected them when the students were finished. Second, the experimenter provided instructions for the Paper Folding Test and the verbal ability test and handed each student both tests. The students had a three-minute time limit for the Paper Folding Test and a ten-minute time limit for the verbal ability test.

After about a week, individual learning sessions were held in an unoccupied classroom during school hours. The students were individually taken out of class and randomly assigned to one of the two learning conditions. First, the experimenter explained the eye-tracking equipment, asked the participant to put on the eye-tracking glasses, and proceeded with a three-point eye-tracking calibration for the participant. Second, the student received written and spoken instructions on how to proceed based on his or her treatment group. Third, the student was given the learning booklet to his or her treatment. Each student was provided with a pen, a pencil, an eraser, and several highlighters with the spoken instruction to use whatever they needed. After these instructions, the student was asked to complete the motivation questionnaire. Next, the participant started learning with the material corresponding to the given treatment while the eye movements were recorded. The reason why participants

had to wear the eye-tracking glasses before they started learning with the text was, on the one hand, to give students time to get used to the eye-tracking glasses and, on the other hand, to allow the experimenter to supervise the eye-tracking accuracy and to recalibrate if necessary.

Both groups were instructed to carefully read the text paragraph by paragraph in order to comprehend the biological topic. Students in the picture group were instructed to read the text and refer to the pictures on the right side of the booklet if they needed support. Students in the drawing group were instructed to read the text and to make a clear and simple drawing for each of the seven paragraphs representing its main ideas. They were also advised to use the pictorial templates given in the legend and to draw on the pre-drawn backgrounds. Both groups had a 30-minute time limit and were told that after learning they would be asked questions about what was learned. Learning time was measured individually.

After the student finished the learning task, the eye-tracking glasses were removed. Then the usability questionnaire was given, in which the student rated whether the eye-tracking glasses affected his or her learning behavior.

The last stage was to complete the three posttests. Students worked at their own rate and did not have access to the text, drawings, or the author-generated pictures. Upon completion, each student was thanked and dismissed. A debriefing took place with all students together after everyone took part in the learning session and did the posttest. We followed guidelines for ethical treatment of human subjects and had schools' and parents' approval for the experiment.

Scoring of the paper-based materials

The drawing accuracy score (concerning drawing during learning in the drawing condition) was computed by using a revised coding scheme adapted from Schmeck et al. (2014), which was based on expert drawings and a checklist specifying important relational features of the drawings. Students received points when they identified critical elements representing the main ideas of each text paragraph and constructed pictures by drawing each of those elements correctly and spatially correct on the pre-drawn background. One important aspect in the second paragraph (as shown in Figure 9) is, for example, that there are several new influenza viruses located outside the somatic cell after the replication process. Students received two points if their drawing included at least two correctly sketched influenza viruses

(including capsule, membrane, and glycoproteins) outside the somatic cell. Points were subtracted if the influenza viruses were indeed recognizable, but missed parts, and for drawing fewer than two viruses. Students had to draw seven pictures in total, one picture for each text paragraph. Maximum drawing accuracy was scored with 32.5 points. The first author and a biology teacher scored the quality for each of the seven drawings for each student with an intraclass correlation of $ICC_{unjust} = .99$.

A maximum of 19 points was possible for the content-related knowledge pretest and for the retention posttest, one point for each correctly answered item. The transfer posttest contained nine multiple-choice items, and students scored one point for each correct answer, yielding a total possible of 9 points. Similar to the drawing accuracy score during learning, the score for the drawing posttest was calculated by counting the total number of correct main ideas in each student's answer across the four drawing items based on an adapted and revised coding scheme from Schmeck et al. (2014). Students could earn a maximum of 20 points. Again, the quality was scored by the first author and a biology teacher with an intraclass correlation of $ICC_{unjust} = .97$.

The Paper Folding Test was scored by adding up the number of correctly answered items and subtracting one point for each incorrectly answered item, with no points for unanswered items. The verbal ability test score for each student was computed by awarding one point for each correct answer and by adding up the points to obtain the total verbal ability score (out of a possible total of 30 points). The median was calculated for the motivation and the eye-tracking usability questionnaire based on the seven-level Likert-scale used in each questionnaire.

Measurement of eye movement behavior

To analyze eye movement data, we established areas of interest (AOIs). An AOI is a defined region on a stimulus, in which eye movements (such as fixations and saccades) are analyzed separately (Holmqvist et al., 2011). Using BeGaze, version 3.7, we created two main AOIs for each of the seven pages: One covered the author-generated picture (for the picture group) or the drawing prompt (for the drawing group) on the right side of the page (workspace AOI) and the other one covered the whole text paragraph on the left side of the page (text AOI), as shown in Figure 10. In addition, within each text AOI, we defined further AOIs covering the most important content of each paragraph (important-text AOI). The determination of

the most important content of each paragraph was done in collaboration with a biology teacher. The size and coverage of all AOIs were identical for both experimental conditions.

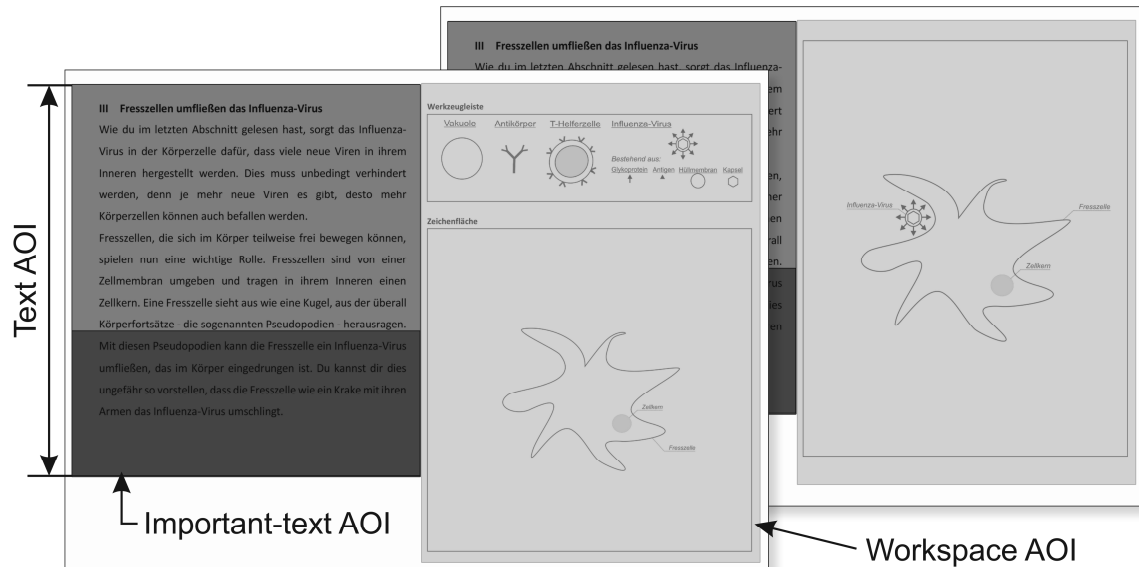


Figure 10: Areas of interests (AOIs) for the drawing group (left) and the picture group (right) for the third page of the learning material. On the left side of each page is the text AOI (with the important-text AOI included in the lower part), and on the right side of each page is the workspace AOI.

There are many possible eye-tracking measures (Holmqvist et al., 2011), but we focus on four indices as indicators of cognitive processing, as shown in Table 1:

1. Number of fixations per word inside the text AOIs (which we name *rereadings*) is computed as the total number of fixations inside the text AOIs divided by the total number of words in the text AOIs, and provides a measure of intentional focus on words. The purpose of the measure is to quantify how much of the text has been read and how carefully. If the entire text is read once, a value about 0.8 is expected, because due to chunking not all words are fixated. If participants read the text or parts of the text several times the value is expected to be higher (Holmqvist et al., 2011; Poole, Ball, & Phillips, 2005).
2. Proportion of relevant fixation time (which we name *focused fixation time*) is the sum of all fixation durations on the important-text AOIs divided by the sum of all fixation durations on the text AOIs, and provides a measure of selective reading attention.
3. The number of times eye fixations move from the workspace AOIs to the text AOIs per minute (which we name *transition rate*) provides a measure of the attempts to integrate visualizations - either self-generated or instructor-provided - and words (e.g., Schmidt-Weigand, Kohnert, & Glowalla, 2010).

4. Proportion of relevant transitions (which we name *meaningful transitions*) is computed as the total number of transitions from the workspace AOIs to the important-text AOIs divided by the total number of transitions from the workspace AOIs to the text AOIs, and provides a measure of the proportion of meaningful attempts to integrate visualizations with corresponding text passages (e.g., Johnson & Mayer, 2012).

2.2.2 Results and Discussion

Are the groups equivalent on basic characteristics?

The first step was to determine whether the groups differed on basic characteristics. A chi-square analysis indicated that the drawing and picture groups did not differ significantly in the proportion of boys and girls, $\chi^2(1) = 0.08, p = .780$. Independent t-tests show that there were no significant group differences in spatial ability, $t(50) = -1.09, p = .281$, verbal ability, $t(50) = -1.49, p = .142$, and age, $t(50) = 0.35, p = .729$. The drawing group ($M = 40.89\%$ correct, $SD = 17.44$) and the picture group ($M = 48.12\%$ correct, $SD = 23.43$) also did not differ in the content-related knowledge pretest, $t(50) = -1.27, p = .209$. As the data for verbal ability and age are not normally distributed, non-parametric tests were used additionally, which also confirmed that there were no significant differences between the groups at the .05 level. Similarly, as the motivation questionnaire and usability questionnaire were measured with an ordinal scaled Likert-scale, non-parametric tests were used to investigate group differences, which also confirmed that there were no significant differences between the groups on the median rating scores at the .05 level. We conclude that the groups do not differ on basic characteristics.

Learning outcomes: Do students learn better from a science text when they generate drawings than when they are given author-generated pictures?

Our basic research question concerns whether students learn better from a science text when they are asked to create drawings as they read as compared to being given a text with author-generated illustrations. If the drawing group engages in deeper learning, we predicted it will perform better on the posttests. The top three rows of Table 2 show the adjusted means and standard deviations of the drawing group and the picture group on the retention posttest, transfer posttest, and drawing posttest, respectively. An analysis of covariance (ANCOVA) with group as a between-subjects factor, retention posttest score as the dependent measure, and pretest score as the covariate shows that the covariate was significantly positively related

to the retention posttest score, $F(1, 49) = 20.06$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .291$, $r = .54$, and that the drawing group scored significantly higher than the picture group on the retention posttest, yielding a medium effect size, $F(1, 49) = 4.94$, $p = .031$, $\eta_p^2 = .092$, $r = .30$. An ANCOVA with group as the between-subjects factor, transfer posttest score as the dependent measure, and pretest score as the covariate shows that the covariate was significantly positively related to the transfer test score, $F(1, 49) = 18.21$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .271$, $r = .52$, and that the groups did not differ significantly on the transfer posttest score, $F(1, 49) = 0.06$, $p = .802$, $\eta_p^2 = .001$, $r = .04$. An ANCOVA with group as the between-subjects factor, drawing posttest score as the dependent measure, and pretest score as the covariate shows that the covariate was significantly positively related to the drawing posttest score, $F(1, 49) = 12.87$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .208$, $r = .46$, and that the drawing group scored significantly higher than the picture group on the drawing posttest, yielding a large effect size, $F(1, 49) = 17.95$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .268$, $r = .52$. None of the analyses violated the assumption of homogeneity of regression slopes.

Table 2: Medians, Means and Standard Deviations of Two Groups on Three Learning Outcome Measures and Four Learning Process Measures for Experiment 1.

Measure	Group						<i>r</i>
	Drawing			Picture			
	<i>Mdn</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Mdn</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
Learning outcomes							
Retention test ^a (% correct)		79.26	19.26		67.30	19.26	.30*
Transfer test ^a (% correct)		67.79	22.70		69.39	22.70	.04
Drawing test ^a (% correct)		75.46	19.26		52.61	19.26	.52***
Learning processes							
Rereadings ^b	2.93	3.12	0.95	1.91	2.12	1.32	.60***
Focused fixation time (%)		59.69	3.75		54.53	3.99	.56***
Transition rate ^b	2.46	2.72	1.18	1.23	1.36	0.79	.59***
Meaningful transitions (%)		59.33	7.59		45.61	22.4	.39**

^aAdjusted means and standard deviations. ^bA Mann-Whitney test was used for the analysis.

* $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$.

To sum up, results provide some evidence concerning the cognitive processing of students who engage in generative drawing. In the present study, both groups received treatments intended to improve learning, but the drawing group outperformed the picture group on two of three measures of learning outcomes, suggesting that asking students to generate drawings is more effective in improving learning outcomes than providing already drawn illustrations.

Learning outcomes: Does the quality of learner-generated drawings predict learning outcomes?

A further research question concerns whether the quality of drawings produced by students in the drawing group is related to performance in tests of learning outcomes. The mean proportion correct on drawing accuracy during learning was 67.93% ($SD = 21.00$). A correlation analysis revealed that the drawing accuracy score of learner-generated drawings correlated significantly with the retention posttest score, $r = .82, p < .001$, with the transfer posttest score, $r = .58, p = .002$, and with the drawing posttest score, $r = .93, p < .001$. These findings provide further evidence for the prognostic drawing principle (Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn et al., 2010), which states that the quality of students' drawings during learning from science texts is predictive of learning outcomes.

Learning processes: Do students exhibit different eye-movement patterns as indicators of cognitive processing during learning when they generate drawings than when they are given author-generated pictures?

Having established that the drawing group performs better on learning outcome posttests than the picture group, the major new focus of this experiment, compared to previous experiments, was to examine how drawing affects cognitive processing during learning, indicators of which we examine through eye-tracking measures.

The bottom portion of Table 2 shows the medians, means, and standard deviations of the drawing group and the picture group on eye-tracking measures of rereading, focused fixation time, transition rate, and meaningful transitions. Our major prediction was that the drawing group will score significantly higher than the picture group on each of these indices of cognitive processing during learning. As the data for rereadings and transition rate are not normally distributed, non-parametric tests were used; for focused fixation time and meaningful transitions independent t-tests were used.

A Mann-Whitney test on rereadings shows that students who engaged in generative drawing read parts of the text significantly more often than students provided with author-generated pictures, $U = 101.50, z = -4.33, p < .001, r = .60$, indicating that the drawing group has read parts of the text more carefully than the picture group. An independent t-test on focused fixation time revealed that the drawing group scored significantly higher than the picture group, $t(50) = 4.81, p < .001, r = .56$, indicating that the drawing group was more focused on key elements while reading than the picture group.

Furthermore, a Mann-Whitney test on transition rate revealed that the drawing group exhibited significantly more workspace-to-text transitions per minute than the picture group, $U = 104.00$, $z = -4.28$, $p < .001$, $r = .59$, indicating more attempts to engage in integrating visualizations and corresponding text passages. In addition, an independent t-test on meaningful transitions shows that the drawing group had a higher proportion of meaningful transitions than the picture group, $t(50) = 2.96$, $p = .006$, $r = .39$, indicating a higher probability of success in integrating visualizations and corresponding text passages. These differences in indicators of cognitive processing during learning represent the primary new findings in this experiment.

Experiment 1 was designed to provide information on cognitive processing during generative drawing by analyzing eye-movement patterns as indicators of cognitive processing. In particular, the eye movement analysis shows that when learners are instructed to engage in generative drawing (a) they had more fixations per word inside the text AOIs, indicating more attentional focus on the text; (b) they had a higher proportion of fixation time on the most important content of the text while reading, indicating more success in selecting relevant information; (c) they had more transitions per minute, indicating more attempts in making connections between visualizations and text; and (d) they had a higher proportion of meaningful transitions, indicating a higher probability of success in making meaningful connections between visualizations and corresponding text passages than learners who received a different instructional strategy (such as providing graphics).

The CMDC interprets cognitive processes in light of self-regulated learning processes. If students are unable to identify the main ideas of the text, they are unable to generate a drawing and are therefore forced to engage in self-regulation processes that lead them back to the instructional material in order to revise their mental model by rereading and reselecting information and integrating them with their work-in-progress drawing. The results of the eye movement analysis are in line with the three-phased self-regulation cycle described in the CMDC and its resulting predictions: Learners who engage in generative drawing during reading a scientific text are more likely to direct their attention towards key elements and their relations in the text (as indicated by focused fixation time) and to engage in meaningful self-monitoring and self-regulation processes in order to externalize the drawing (as indicated by rereadings, transition rate, and the proportion of meaningful transitions).

2.3 Experiment 2

Experiment 2 aimed at serving two main goals: First, we wanted to examine whether the performance on learning outcome measures and the eye-tracking patterns obtained in Experiment 1 can be replicated for the drawing group in Experiment 2. Second, we were interested in whether the eye-tracking patterns of the drawing group can be distinguished from eye-tracking patterns of another generative learning strategy such as summarizing. Like drawing, summarizing is intended to foster appropriate cognitive processing during learning which should be beneficial for learning outcomes; but unlike drawing, summarizing relies mainly on verbal processing whereas drawing includes visual processing (Fiorella & Mayer, 2015; van Meter & Firetto, 2013). Thus, although both learning strategies are intended to promote better learning outcomes, they may accomplish that goal by fostering somewhat different cognitive processes during learning.

Following Leopold and Leutner (2012), we predicted that drawing would be more helpful than summarizing to help students to create a deep level understanding of the text's content. Thus, we expected students in the drawing group to focus more on the important content of the text while reading and to have a higher proportion of meaningful transitions than the summarizing group. As in Experiment 1, the quality of students' drawings should also predict learning outcomes.

2.3.1 Method

Participants and design

The participants were 43 ninth graders in German higher track secondary schools. The data for seven participants were excluded from analyses due to eye-tracking system calibration problems or due to measurement errors and one was removed because the student did not follow the instructions. For the analyses that follow, there were 35 participants with an average age of 14.09 years ($SD = 0.51$). The proportion of females was 71.4%. There were two groups based on a between-subjects design, with 17 students randomly assigned to the drawing group (who were instructed to draw pictures on paper that reflect the main elements and relations described in the text) and 18 students randomly assigned to the summarizing group (who were instructed to write summaries on paper that reflect the main ideas of the text and thus served as the control group).

Procedure

The procedure was the same as in Experiment 1, except that the summarizing group was asked to produce a written summary of each paragraph. As in Experiment 1, the students were randomly assigned to one of the two learning conditions. Both groups were instructed to produce drawings or summaries, respectively, that are short, simple, and clear, reflect only the main content of each paragraph, and use the elements given in the legends.

Scoring of the paper-based materials

All paper-based instruments were scored with the same procedures used in Experiment 1. The first author and a student assistant (teacher trainee) scored the quality for each of the seven drawings for each student with an intraclass correlation of $ICC_{unjust} = .97$ and each of the four drawing items of the drawing test for each student with an intraclass correlation of $ICC_{unjust} = .91$.

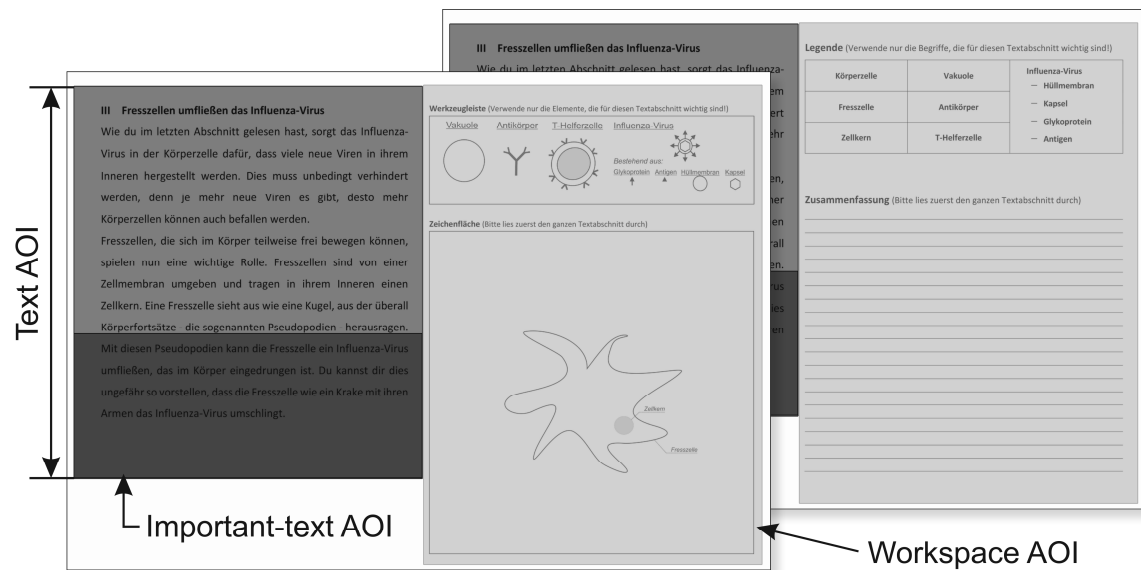


Figure 12: Areas of interests (AOIs) for the drawing group (left) and the summarizing group (right) for the third page of the learning material. On the left side of each page is the text AOI (with the important-text AOI included in the lower part), and on the right side of each page is the workspace AOI.

Measurement of eye movement behavior

Identical AOIs were used as in Experiment 1 (as shown in Figure 12), created with BeGaze, version 3.7. Again, the main eye-tracking metrics were rereadings, focused fixation time, transition rate, and meaningful transitions.

2.3.2 Results and Discussion

Are the groups equivalent on basic characteristics?

Before testing the hypotheses, we analyzed whether groups differed on basic characteristics. A chi-square analysis indicated that the drawing and summarizing groups did not differ significantly in the proportion of boys and girls, $\chi^2(1) = 0.01, p = .915$. Independent t-tests show that there were no significant group differences in spatial ability, $t(33) = -0.57, p = .572$, verbal ability, $t(33) = -0.43, p = .671$, and age, $t(33) = -0.30, p = .765$. The drawing group ($M = 34.67\%$ correct, $SD = 12.35$) and the summarizing group ($M = 35.67\%$ correct, $SD = 11.78$) also did not differ in the content-related knowledge pretest, $t(33) = -0.25, p = .808$, but because of the low reliability in this small sample (Cronbach's $\alpha = .29$), the content-related knowledge pretest will not be considered in the following analyses. As the data for spatial ability and age are not normally distributed, non-parametric tests were used additionally, which also confirmed that there were no significant differences between the groups at the .05 level. Similarly, as the motivation questionnaire and usability questionnaire were measured with an ordinally scaled Likert-scale, non-parametric tests were used to investigate group differences, which also confirmed that there were no significant differences between the groups on the median rating scores at the .05 level. We conclude that the groups do not differ on basic characteristics.

Learning outcomes: Does the performance of the drawing group in Experiment 1 correspond to the performance of the drawing group in Experiment 2?

A main goal in Experiment 2 was to determine whether the drawing group in Experiment 2 produced a drawing accuracy and learning outcome scores as in Experiment 1. Independent t-tests show that there were no significant differences between the two drawing groups on the drawing accuracy, $t(41) = -0.51, p = .959$, the retention posttest $t(41) = 0.96, p = .342$, the transfer posttest, $t(41) = 1.07, p = .289$, and the drawing posttest, $t(41) = -0.72, p = .474$. We conclude that the drawing accuracy and learning outcomes of the drawing group in Experiment 2 were equivalent to the drawing group in Experiment 1.

Learning outcomes: Do students learn better from a science text when they generate drawings than when they generate summaries?

A secondary goal was to determine whether the drawing group and the summarizing group in Experiment 2 differed in learning outcome performance. The top three rows of Table 3

show the means and standard deviations of the drawing group and the summarizing group on the retention posttest, transfer posttest, and drawing posttest, respectively. Independent t -tests show that there was no significant effect of group on the retention posttest $t(33) = -1.03$, $p = .314$, and the transfer posttest, $t(33) = -0.46$, $p = .647$. However, as expected, the drawing group scored significantly higher than the summarizing group on the drawing test, yielding a large effect size, $t(33) = 4.63$, $p < .001$, $r = .63$. Overall, we conclude that the groups achieved equivalent learning outcomes in terms of verbal content from the lessons, i.e., they achieved equivalent levels of learning of the text material.

Table 3: Means and Standard Deviations of Two Groups on Three Learning Outcome Measures and Four Learning Process Measures for Experiment 2.

Measure	Group				<i>r</i>
	Drawing		Summarizing		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
Learning outcomes					
Retention test (% correct)	71.83	13.79	78.07	21.61	.19
Transfer test (% correct)	57.52	25.83	61.11	19.89	.08
Drawing test (% correct)	78.09	15.95	50.72	18.80	.63***
Learning processes					
Rereadings	3.11	0.85	5.12	1.43	.57***
Focused fixation time (%)	61.95	4.39	58.41	4.06	.40*
Transition rate	2.89	1.08	5.65	1.76	.69***
Meaningful transitions (%)	65.06	10.02	58.48	6.21	.38*

* $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$.

Learning outcomes: Does the quality of learner-generated drawings predict learning outcomes?

As in Experiment 1, we tested whether the quality of students' drawings predicts learning outcomes and therefore provides further support for the prognostic drawing principle. The mean proportion correct on drawing accuracy during learning was 68.24% ($SD = 15.91$). A correlation analysis revealed that the drawing accuracy score of learner-generated drawings correlated significantly with retention posttest score, $r = .87$, $p < .001$, and drawing test score, $r = .89$, $p < .001$. There was no significant correlation, however, with the transfer test score, $r = .29$, $p = .266$. The lack of significance for transfer may reflect the small sample size of 17 participants in the drawing group. These findings are partly consistent with the results of Experiment 1 and provide further evidence for the prognostic drawing principle

(Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn et al., 2010), which states that the quality of students' drawings during learning from science texts is predictive of learning outcomes.

Learning processes: Does the performance of the drawing group in Experiment 1 correspond to the performance of the drawing group in Experiment 2?

Experiment 2 was to determine whether the eye-tracking patterns of the drawing group in Experiment 1 could be replicated and compared against another learning generative strategy, i.e., summarizing. The bottom four rows of Table 3, showing scores on the four eye-tracking measures for the drawing group in Experiment 2, are partly comparable to the bottom four rows of Table 2 for the drawing group in Experiment 1. The drawing group in Experiment 1 and the drawing group in Experiment 2 yielded eye-tracking scores that did not differ significantly on rereadings, $t(41) = 0.04$, $p = .967$, focused fixation time, $t(41) = -1.80$, $p = .079$, and transition rate, $t(41) = -0.47$, $p = .638$. The groups only differ significantly in the proportion of meaningful transitions, $t(41) = -2.13$, $p = .039$, $r = .32$. The higher proportion of meaningful transitions in Experiment 2 could be due to the fact that in Experiment 2 only ninth grade students participated, whereas in Experiment 1 the drawing group consisted of both eighth and ninth grade students. Ninth graders are cognitively further developed and may have more sophisticated cognitive schemas than eighth graders.

We conclude that the eye-movement patterns as indicators of cognitive processes of the drawing group in Experiment 2 are almost equivalent to those of the drawing group in Experiment 1, indicating a replication of the pattern of eye-tracking measures.

Learning processes: Do students exhibit different eye-movement patterns as indicators of cognitive processing during learning when they generate drawings than when they generate summaries?

A major research question for Experiment 2 concerns whether the drawing group and summarizing group differ in their indicators of cognitive processing during learning, as reflected in the four eye-tracking measures. The bottom portion of Table 3 shows the means and standard deviations of the drawing group and summarizing group on each of the four eye-tracking indices. On the one hand, an independent t-test on rereadings revealed that the drawing group read parts of the text significantly less often than the summarizing group, $t(33) = -5.12$, $p < .001$, $r = .57$, indicating that the summarizing group has read parts of the text more carefully than the drawing group. On the other hand, an independent t-test on focused fixation time revealed that the drawing group scored significantly higher than the summarizing

group, $t(33) = 2.48$, $p = .018$, $r = .40$, indicating that the drawing group was more focused on key elements while reading than the summarizing group. Concerning the attempts to engage in the process of integrating, an independent t-test on transition rate shows that the drawing group exhibited significantly less workspace-to-text transitions per minute than the summarizing group, $t(33) = -5.54$, $p < .001$, $r = .69$. However, the drawing group scored significantly higher than the summarizing group on meaningful transitions, $t(33) = 2.35$, $p = .025$, $r = .38$, indicating that students who drew engaged more deeply in making meaningful connections between relevant text passages and respective visualization aspects than students who summarized and thus were supposed to make these connections between relevant text and the notes that they extracted from this text.

In spite of the fact that the groups did not differ on learning outcome measures involving the presented verbal information, they did differ in indices of those learning processes that lead to the learning outcomes. The summarizing group displayed overall more attentional focus on the text (as indicated by rereadings) and more attempts in making connections between the generated summaries and the text (as indicated by transition rate), whereas the drawing group displayed more strategically focused processing of the text by focusing more attention on relevant text passages (as indicated by focused fixation time) and connections between relevant text passages and generated drawings (as indicated by meaningful transitions). Thereby, as expected, the summarizing group also engaged in self-monitoring and self-regulation processes, but had lower proportions of focused fixation time and meaningful transitions than the drawing group. The higher frequency of transitions and rereadings in the summarizing group could be due to the difficult technical terms (such as “glycoproteins”, “pseudopodia”) that students in the summarizing group had to copy from the text to their summaries. In contrast to the summarizing group, however, the eye-movement patterns of the drawing group provide further evidence for the assumed self-regulation cycle, which forces learners’ attention more on relevant words and connections (van Meter & Firetto, 2013).

We conclude that the eye-movement patterns of the students who engaged in generative drawing can be distinguished from the eye-movement patterns of students who engaged in summarizing.

2.4 General Discussion

Empirical Contributions

The present set of experiments enables us to better understand how generative drawing works as a learning strategy, especially in contrast to other learning strategies. The primary empirical contribution of Experiment 1 is that students who are asked to draw illustrations as they read a scientific text display different learning outcomes (as measured by posttests) and different indicators of the cognitive processes of selecting and integrating during learning (as measured by eye-tracking metrics) than students who read the same text with author-generated pictures. In particular, the drawing group had more fixations per words inside the text AOIs, a higher proportion of focused fixation time in relevant text, more workspace-to-text transitions per minute and a higher proportion of meaningful transitions from visualizations to relevant text than the picture group. The primary empirical contribution of Experiment 2 is that students who are asked to draw as they read achieve equivalent learning outcomes as students who are asked to summarize as they read (as measured by retention and transfer posttests), but display different learning processes (as measured by eye-tracking metrics). In particular, the drawing group had fewer fixations per words inside the text AOIs and fewer workspace-to-text transitions per minute, but a higher proportion of focused fixation time in relevant text and a higher proportion of meaningful transitions from the generated content to corresponding text passages than the summarizing group. Furthermore, in both experiments the accuracy of the drawings that students make correlates with posttest scores, and the drawing accuracy, the performance on posttests, and, partly, eye-tracking measures do not differ significantly for the drawing group in Experiment 1 and Experiment 2, providing a useful replication.

Theoretical Contributions

The present set of experiments contributes to evaluating the theoretical assumptions of the *Cognitive Model of Drawing Construction* (CMDC; van Meter & Firetto, 2013) by using mobile eye-tracking technology. The strength of eye-tracking methodology is its ability to measure indicators of cognitive processing during learning, in contrast to posttests that reflect learning outcomes. As van Meter and Firetto (2013) explain in their CMDC, “metacognitive control is responsible for guiding and affecting the operations a learner carries out” (p. 260). By creating a drawing learners receive intuitive feedback on their comprehension of the text: If some portion of the drawing cannot be externalized, learners know that the

learning material might not been understood well enough and that they need to seek necessary clarification in order to finish the drawing task. Our findings are consistent with these assumptions: In both experiments, learners with drawing instruction engaged in regulation processes to revise their mental model by switching back to the text and rereading parts of it in order to select the proper information and integrate it with their work-in-progress drawing. Importantly, the results of both experiments show that learners who engage in generative drawing during reading a scientific text are more likely to direct their attention towards key elements of the text and are more likely to make meaningful connections between their generated drawing and corresponding text passages when compared against a group that received a different instructional strategy (such as providing graphics in Experiment 1) or a group that was prompted to use a different learning strategy (such as summarizing in Experiment 2).

Thus, this work helps move beyond demonstrating a generative drawing effect by comparing a drawing group to a non-drawing control group, to investigate the underlying cognitive processes that contribute to the power of generative drawing.

Practical Contributions

This study points to the potential of drawing as a generative learning strategy that primes deep cognitive processing (i.e., paying attention to the relevant material and making connections between visualization and corresponding text passages) during learning, whereby the quality of the drawings predicts learning outcomes. Based on these findings, we concur with the *prognostic drawing principle*: “The quality of learners’ drawings during learning predicts the quality of their learning outcomes” (Schwamborn et al., 2010, p. 878; see also Leutner & Schmeck, 2014). It should be noted that students were provided with drawing tools during drawing, so the generative drawing principle may work best when students have support in drawing (Fiorella & Mayer, 2015).

Limitations and Future Directions

Eye-tracking methodology provides valuable task-relevant information, but the data should be interpreted with caution. Although the eye-mind assumption claims a direct relationship between fixations and the way information is being processed, the eye-tracking data does not guarantee that students actually comprehend the relevant information while fixating it (Hyönä, 2010) or in particular what they are thinking while performing their tasks (Hol-

sanova, Holmberg, & Holmqvist, 2008; Triesch, Ballard, Hayhoe, & Sullivan, 2003). Another approach might be to complement the quantitative eye-tracking data with a qualitative analysis of the video data, which could shed some light on the blind spots of quantitative eye-tracking data - for example, in which situations students gazed around in a disoriented way. A limitation of the present set of studies is that no verbal data as an information source on cognitive processes in working memory was used in addition to the eye-tracking data. Future studies might complement the eye-tracking data with retrospective verbalizations (i.e., recording think-aloud *after* the task is performed) in order to enhance the findings (Jarodzka, Scheiter, Gerjets, & van Gog, 2010; van Gog, Paas, van Merriënboer, & Witte, 2005; van Gog & Scheiter, 2010).

There was no classic (reading only) control group in either experiment, but rather the drawing group was compared to a group that received a different instructional strategy or was prompted to use a different learning strategy. This is because our intention was to go beyond a further replication of the generative drawing effect (e.g., Leopold, Sumfleth, & Leutner, 2013; Schmeck, 2010; Schmeck et al., 2014; Schwaborn et al., 2010, for an overview see Fiorella & Mayer, 2015).

In both experiments, the transfer posttest failed to discriminate between the groups. There is evidence that the benefits of generative drawing are limited to local knowledge, which is specific to the information presented in the instructional material and that is tied to the structure of the material (van Meter & Firetto, 2013; Waters, van Meter, Perrotti, Drogo, & Cyr, 2005, 2011). On the other hand, some studies reported positive effects of generative drawing on transfer performance (e.g., Gobert & Clement, 1999; Leopold & Leutner, 2012; Schwaborn et al., 2010; for an overview see Fiorella & Mayer, 2015). Van Meter & Firetto (2013) predict in the CMDC, that when the drawing strategy is used, knowledge-based performance will be equally bound to the specific characteristics of the constructed mental model. They conclude that “improved performance can only be expected when the posttest assessments are well-matched to the characteristics of the specific knowledge representation that is constructed” (p. 263). Future studies on generative drawing, however, might investigate under which conditions generative drawing improves performance on transfer. However, particular attention should be paid to the transfer posttest to be used. The transfer posttest needs to be well-matched to the characteristics of the constructed mental model in order to be a sensitive measure.

In Experiment 2, Cronbach's alpha was rather low for some of the instruments. Concerning the content-knowledge pretest, the low Cronbach's alpha could indicate that the students had no prior knowledge at all on the immunology subject and only blind-guessed the answers. Therefore, we decided to exclude prior knowledge from further analyses. Furthermore, in Experiment 2, both verbal and spatial ability tests were only used to ensure that the groups were equivalent on basic characteristics. Thus, future research with more participants is needed to investigate the effects of generative drawing in comparison to summarizing on learning outcomes.

Last but not least, in Experiment 2 we did not find an advantage of the drawing instruction over the summarizing instruction in terms of learning outcome, as was expected and found by Leopold and Leutner (2012) at least for their transfer test ($d = 1.07$, $p = .002$). The main difference between the two studies is that in Leopold and Leutner (2012), as opposed to the present experiment, there were no scaffolded prompts, neither in the drawing condition (in form of a legend and a pre-drawn background) nor in the summarizing condition (in form of a legend). The eye-tracking data indicate that in our experiment the summarizing group showed significantly fewer transitions to the toolbar and overall fixation durations on the toolbar than the drawing group. Thus, further research is needed to investigate the impact of the scaffolded prompts. Future research might investigate the eye movement behavior of both groups with and without scaffolded prompts and whether such basic instructional support for selecting and representing important information from the text is able to moderate the effect of drawing and/or summarizing on learning outcome measures. In addition, our students might have been more familiar with the summarizing strategy, which might have led to comparable learning outcomes. Summarizing is one of the first learning strategies to be taught in German schools and most German school books include a methodological section with the explanation of how to read and understand a text in five steps (read the headlines, scan the text, clarify unknown words, read the text carefully and highlight key words, summarize in your own words; see e.g., a German class textbook by Schurf & Wagener, 2015, or a biology class textbook by Eck, Hegemann, Marx, & Spieß, 2016).

Overall, this set of experiments provides not only further empirical evidence for the effectiveness of generative drawing in improving learning outcomes, but also allows deeper insight into the underlying cognitive and metacognitive processes during learning, which so far have only been assumed on a theoretical basis.

2.5 References

- Alesandrini, K. L. (1984). Pictures and adult learning. *Instructional Science*, 13, 63–77.
- Baumert, J., Klieme Eckhard, Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., . . . Weiß, M. (Eds.). (2001). *PISA 2000: Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich [PISA 2000: Competencies of German students compared to international results]*. Opladen: Leske + Budrich.
- Brandstetter, M., Sandmann, A., & Florian, C. (2017). Understanding pictorial information in biology: Students' cognitive activities and visual reading strategies. *International Journal of Science Education*, 4(1), 1–20.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1320454>
- Carney, R. N., & Levin, J. R. (2002). Pictorial illustrations still improve students' learning from text. *Educational Psychology Review*, 14(1), 5–26.
- Cheng, M. M. W., & Gilbert, J. K. (2014). Students' visualization of diagrams representing the human circulatory system: The use of spatial isomorphism and representational conventions. *International Journal of Science Education*, 37(1), 136–161.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2014.969359>
- Chittleborough, G., & Treagust, D. (2008). Correct interpretation of chemical diagrams requires transforming from one level of representation to another. *Research in Science Education*, 38(4), 463–482. <https://doi.org/10.1007/s11165-007-9059-4>
- Cook, M., Carter, G., & Wiebe, E. N. (2008). The interpretation of cellular transport graphics by students with low and high prior knowledge. *International Journal of Science Education*, 30(2), 239–261. <https://doi.org/10.1080/09500690601187168>
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision research*, 36(12), 1827–1837.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00294-4)
- Eck, M., Hegemann, B., Marx, U., & Spieß, C. (2016). *Natura - Biologie für Gymnasien und Gesamtschulen [Natura - biology class textbook for higher track schools]* (1st ed.). Stuttgart, Leipzig: Ernst Klett Verlag.
- Ekstrom, R. B., French, J. W., & Harman, H. H. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests*. Princeton, NJ: Educational Testing Service.
- Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity: Eight learning strategies that promote understanding*. New York: Cambridge University Press.

- Gobert, J. D., & Clement, J. J. (1999). Effects of student-generated diagrams versus student-generated summaries on conceptual understanding of causal and dynamic knowledge in plate tectonics. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 39.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199901\)36:1<39::AID-TEA4>3.3.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1<39::AID-TEA4>3.3.CO;2-9)
- Greene, T. R. (1989). Children's understanding of class inclusion hierarchies: The relationship between external representation and task performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48(1), 62–89. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(89\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0022-0965(89)90041-6)
- Hall, V. C., Bailey, J., & Tillman, C. (1997). Can student-generated illustrations be worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 89(4), 677–681.
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.4.677>
- Hannus, M., & Hyönä, J. (1999). Utilization of illustrations during learning of science textbook passages among low- and high-ability children. *Contemporary Educational Psychology*, 24(2), 95–123. <https://doi.org/10.1006/ceps.1998.0987>
- Hegarty, M., & Just, M. A. (1993). Constructing mental models of machines from text and diagrams. *Journal of Memory and Language*, 32(6), 717–742.
<https://doi.org/10.1006/jmla.1993.1036>
- Hegarty, M., Mayer, R. E., & Green, C. E. (1992). Comprehension of arithmetic word problems: Evidence from students' eye fixations. *Journal of Educational Psychology*, 84(1), 76–84. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.1.76>
- Heller, K. A., & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4–12. Klassen, Revision [Cognitive ability test for grades 4–12, revised version]*. Göttingen: Hogrefe.
- Hoffman, J. E., & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 57(6), 787–795.
<https://doi.org/10.3758/BF03206794>
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & van de Weijer, Joost. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press.
- Holsanova, J., Holmberg, N., & Holmqvist, K. (2008). Reading information graphics: The role of spatial contiguity and dual attentional guidance. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9), 1215–1226. <https://doi.org/10.1002/acp.1525>
- Hyönä, J. (2010). The use of eye movements in the study of multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20(2), 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.013>

- Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P., & van Gog, T. (2010). In the eyes of the beholder: How experts and novices interpret dynamic stimuli. *Learning and Instruction*, 20(2), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.019>
- Johnson, C. I., & Mayer, R. E. (2012). An eye movement analysis of the spatial contiguity effect in multimedia learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18(2), 178–191. <https://doi.org/10.1037/a0026923>
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8(4), 441–480. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3)
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329–354. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.4.329>
- Kintsch, E. (1990). Macroprocesses and microprocesses in the development of summarization skill. *Cognitive and Instruction*, 7(3), 161–195. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0703_1
- Kintsch, W., & van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85(5), 363–394. <https://doi.org/10.1037//0033-295X.85.5.363>
- Kragten, M., Admiraal, W., & Rijlaarsdam, G. (2013). Diagrammatic literacy in secondary science education. *Research in Science Education*, 43(5), 1785–1800. <https://doi.org/10.1007/s11165-012-9331-0>
- Kragten, M., Admiraal, W., & Rijlaarsdam, G. (2015). Students' Learning Activities While Studying Biological Process Diagrams. *International Journal of Science Education*, 37(12), 1915–1937. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1057775>
- Larkin, J. H., & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11(1), 65–100. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6708.1987.tb00863.x>
- Leopold, C., & Leutner, D. (2012). Science text comprehension: Drawing, main idea selection, and summarizing as learning strategies. *Learning and Instruction*, 22(1), 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.05.005>
- Leopold, C., & Leutner, D. (2015). Improving students' science text comprehension through metacognitive self-regulation when applying learning strategies. *Metacognition and Learning*, 10, 313–346. <https://doi.org/10.1007/s11409-014-9130-2>

- Leopold, C., Sumfleth, E., & Leutner, D. (2013). Learning with summaries: Effects of representation mode and type of learning activity on comprehension and transfer. *Learning and Instruction*, 27, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.003>
- Lesgold, A. M., Good, H. de, & Levin, J. R. (1977). Pictures and young children's prose learning: A supplementary report. *Journal of Literacy Research*, 9(4), 353–360. <https://doi.org/10.1080/10862967709547240>
- Lesgold, A. M., Levin, J. R., Shimron, J., & Guttman, J. (1975). Pictures and young children's learning from oral prose. *Journal of Educational Psychology*, 67(5), 636–642. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.67.5.636>
- Leutner, D., Leopold, C., & Sumfleth, E. (2009). Cognitive load and science text comprehension: Effects of drawing and mentally imagining text content. *Computers in Human Behavior*, 25(2), 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.12.010>
- Leutner, D., & Schmeck, A. (2014). The generative drawing principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 433–448). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mason, L., Pluchino, P., Tornatora, M. C., & Ariasi, N. (2013). An Eye-Tracking Study of Learning From Science Text With Concrete and Abstract Illustrations. *The Journal of Experimental Education*, 81(3), 356–384. <https://doi.org/10.1080/00220973.2012.727885>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2010). Unique contributions of eye-tracking research to the study of learning with graphics. *Learning and Instruction*, 20(2), 167–171. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.012>
- Mayer, R. E. (2014). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 43–71). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ponce, H. R., & Mayer, R. E. (2014). An eye movement analysis of highlighting and graphic organizer study aids for learning from expository text. *Computers in Human Behavior*, 41, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.09.010>
- Poole, A., Ball, L. J., & Phillips, P. (2005). In search of salience: A response-time and eye-movement analysis of bookmark recognition. In S. Fincher, P. Markopoulos, D. Moore, & R. Ruddle (Eds.), *People and computers XVIII - Design for life: Proceedings of HCI 2004* (pp. 363–378). London: Springer. https://doi.org/10.1007/1-84628-062-1_23

- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>
- Rayner, K., McConkie, G. W., & Ehrlich, S. (1978). Eye movements and integrating information across fixations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4(4), 529–544. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.4.4.529>
- Rheinberg, F., Vollmeyer, R., & Burns, B. D. (2001). FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen [QCM: A questionnaire to assess current motivation in learning situations]. *Diagnostica*, 47, 57–66.
- Schmeck, A. (2010). Visualisieren naturwissenschaftlicher Sachverhalte: Der Einsatz von vorgegebenen und selbst generierten Visualisierungen als Textverstehenshilfen beim Lernen aus naturwissenschaftlichen Sachtexten [Visualization of science text content: Using provided and learner-generated visualizations as aids for comprehension in learning from science texts (Dissertation)]. University of Duisburg-Essen, Essen. Retrieved from http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-25873/Diss_Schmeck.pdf
- Schmeck, A., Mayer, R. E., Opfermann, M., Pfeiffer, V., & Leutner, D. (2014). Drawing pictures during learning from scientific text: Testing the generative drawing effect and the prognostic drawing effect. *Contemporary Educational Psychology*, 39(4), 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2014.07.003>
- Schmidgall, S. P. (2017). Drawing to learn: Investigating the role of contributing factors and instructional support for learner-generated drawing (Dissertation). Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen, Germany.
- Schmidt-Weigand, F., Kohnert, A., & Glowalla, U. (2010). A closer look at split visual attention in system- and self-paced instruction in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20(2), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.011>
- Schnotz, W. (2005). An integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (pp. 49–70). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.005>
- Schnotz, W. (2014). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 72–103). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>

- Schnotz, W., & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13(2), 141–156.
[https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8)
- Schnotz, W., Ludewig, U., Ullrich, M., Horz, H., McElvany, N., & Baumert, J. (2014). Strategy shifts during learning from texts and pictures. *Journal of Educational Psychology*, 106(4), 974–989. <https://doi.org/10.1037/a0037054>
- Schönborn, K. J., Anderson, T. R., & Grayson, D. J. (2002). Student difficulties with the interpretation of a textbook diagram of immunoglobulin G (IgG). *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 30(2), 93–97.
<https://doi.org/10.1002/bmb.2002.494030020036>
- Schurf, B., & Wagener, A. (Eds.). (2015). *Deutschbuch [German class textbook]* (1st ed.). Berlin: Cornelsen.
- Schwamborn, A., Mayer, R. E., Thillmann, H., Leopold, C., & Leutner, D. (2010). Drawing as a generative activity and drawing as a prognostic activity. *Journal of Educational Psychology*, 102(4), 872–879. <https://doi.org/10.1037/a0019640>
- Schwonke, R., Berthold, K., & Renkl, A. (2009). How multiple external representations are used and how they can be made more useful. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9), 1227–1243. <https://doi.org/10.1002/acp.1526>
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning and Instruction*, 13(2), 227–237. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00022-1)
- She, H.-C., & Chen, Y.-Z. (2009). The impact of multimedia effect on science learning: Evidence from eye movements. *Computers & Education*, 53(4), 1297–1307.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.06.012>
- Triesch, J., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Sullivan, B. T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, 3(1), 86–94. <https://doi.org/10.1167/3.1.9>
- Underwood, G., Humphrey, K., & Foulsham, T. (2008). Knowledge-based patterns of remembering: Eye movement scanpaths reflect domain experience. In A. Holzinger (Ed.), *Lecture Notes in Computer Science: vol. 5298. HCI and usability for education and work: 4th symposium for the workgroup human-computer interaction and usability engineering of the austrian computer society, USAB 2008, Graz, Austria, November 20-21, 2008 proceedings* (pp. 125–144). Berlin: Springer.
- van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.

- van Gog, T., Paas, F. G., van Merriënboer, J. J. G., & Witte, P. (2005). Uncovering the problem-solving process: Cued retrospective reporting versus concurrent and retrospective reporting. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11(4), 237–244.
<https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.4.237>
- van Gog, T., & Scheiter, K. (2010). Eye tracking as a tool to study and enhance multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20(2), 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.009>
- van Meter, P. (2001). Drawing construction as a strategy for learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 93(1), 129–140. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.93.1.129>
- van Meter, P., Aleksic, M., Schwartz, A., & Garner, J. (2006). Learner-generated drawing as a strategy for learning from content area text. *Contemporary Educational Psychology*, 31(2), 142–166. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2005.04.001>
- van Meter, P., & Firetto, C. M. (2013). Cognitive model of drawing construction: Learning through the construction of drawings. In G. J. Schraw, M. T. McCrudden, & D. R. Robinson (Eds.), *Current perspectives on cognition, learning, and instruction. Learning through visual displays* (pp. 247–380). Charlotte, N.C.: Information Age Publishing.
- van Meter, P., & Garner, J. (2005). The promise and practice of learner-generated drawing: Literature review and synthesis. *Educational Psychology Review*, 17(4), 285–325.
<https://doi.org/10.1007/s10648-005-8136-3>
- Waters, J. R., van Meter, P., Perrotti, W., Drogo, S., & Cyr, R. J. (2005). Cat dissection vs. sculpting human structures in clay: An analysis of two approaches to undergraduate human anatomy laboratory education. *Advances in physiology education*, 29(1), 27–34.
<https://doi.org/10.1152/advan.00033.2004>
- Waters, J. R., van Meter, P., Perrotti, W., Drogo, S., & Cyr, R. J. (2011). Human clay models versus cat dissection: How the similarity between the classroom and the exam affects student performance. *Advances in physiology education*, 35(2), 227–236.
<https://doi.org/10.1152/advan.00030.2009>
- Winne, P. H., & Hadwin, A. F. (1998). Studying as self-regulated learning. In D. J. Hacker, J. Dunlosky, & A. C. Graesser (Eds.), *Metacognition in educational theory and practice* (pp. 277–304). Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Winne, P. H., & Perry, N. E. (2000). Measuring self-regulated learning. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, & M. Zeidner (Eds.), *Handbook of self-regulation* (pp. 531–566). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012109890-2/50045-7>

3 Study III: Cognitive Processing of Experts and Novices During Generative Drawing: An Eye-Tracking Analysis¹⁶

Abstract

Generative drawing is a self-regulated learning strategy in which learners are asked to create drawings that illustrate the main content of a text-based lesson. The theoretical framework underlying generative drawing ascribes the learning effects of drawing to mental model construction, which, in turn, is influenced by cognitive processing and prior knowledge. To investigate the influence of prior knowledge on cognitive processing that leads to mental model construction, the eye movements of students with high and low prior knowledge were recorded. Results show that experts create higher-quality drawings and score higher on learning outcome measures than novices. Moreover, novices overall display more attentional focus on the entire text, whereas experts focus more of their attention on relevant content. Both groups do not differ in making meaningful connections between visualizations and words. Overall, this research contributes new evidence on how prior knowledge influences generative processing that leads to mental model construction.

Keywords: generative drawing, multimedia learning, cognitive processing, mental model construction, eye-tracking, experts and novices.

¹⁶ Based on a manuscript version of: Hellenbrand, J., Opfermann, M., Schmeck, A., & Leutner, D. (submitted). Cognitive processing of experts and novices during generative drawing: An eye-tracking Analysis.

3.1 Theoretical Background

Learning about complex scientific topics can be very challenging for many learners. Especially for learners with low prior knowledge, the identification and integration of relevant aspects of the learning materials, in order to construct a coherent mental representation, might cause an overload of their working memory. A very common suggestion to free working memory capacities for schema construction and comprehension processes is to use learning materials that combine text and illustrations in a meaningful way. Based on the underlying assumption that information processing in working memory takes place by means of dual coding in a verbal and a visual channel (Baddeley, 1999; Paivio, 1986, 2006), theories such as the *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML; Mayer, 2009, 2014a) or the *Integrated Model of Text and Picture Comprehension* (ITPC; Schnotz, 2014) suggest to use multimedia instructional materials to make use of both channels instead of overloading just one.

The CTML describes learning as *generative* cognitive processing that includes the selection of relevant words and images for processing in working memory, their organization in verbal and pictorial representations, and the integration of information being processed in the verbal and visual channel and their connection with prior knowledge activated from long-term memory (Mayer, 2009, 2014a). The advantages of learning with text and pictures have been shown in a wide range of domains and learning scenarios (for an overview see Mayer, 2014b; for a critical reflection see Rey, 2010). Most of this research has focused on rather “classic” instructional settings, in which learning materials are *presented* to learners. However, learning nowadays is seen as a process that should take place in a self-regulated fashion (Fiorella & Mayer, 2015), that is, “an active, constructive process whereby learners set goals for their learning and then attempt to monitor, regulate, and control their cognition, motivation and behavior [...]” (Pintrich, 2000, p. 453).

In this regard, learning with text and pictures could also mean that the pictures are not presented alongside a text, but that they have to be learner-generated to support self-regulatory learning processes. In other words, learners can be instructed to *draw* what they just have read (Leutner & Schmeck, 2014; van Meter & Firetto, 2013). Drawing as a generative activity has received a remarkable amount of attention, especially within the last two decades, and has been taken up in the *Cognitive Model of Drawing Construction* (van Meter & Firetto, 2013; see also *Generative Theory of Drawing Construction*; van Meter & Garner, 2005). By

asking students to create their own drawings while reading a scientific text, they are encouraged to engage actively in generative processing such as selecting key elements and relations, organizing them into descriptive and depictive representations, and integrating the mental representations with each other and with prior knowledge into a coherent mental model. Moreover, the cognitive processes required for the drawing task are driven by mechanisms of metacognitive awareness and control, which are automatically triggered by students' efforts to externalize the mental model as a drawing.

However, prior knowledge plays a major role in mental model construction: "Prior knowledge includes schemas, categories, models, and principles that can help guide what the learner selects for further processing, how the learner organizes it, and how the learner links it with other structurally similar knowledge" (Fiorella & Mayer, 2015, p. 5). On the other hand, the learner who lacks prior knowledge might overlook or ignore crucial information while reading and therefore develop only a superficial mental model (Cook, Carter, & Wiebe, 2008; Snyder, 2000). While such differences between learners with high and low prior knowledge have been shown in a wide range of educational settings and instructional designs, they have not yet been investigated with regard to generative drawing. The primary purpose of the present study is to investigate the impact of prior knowledge on generative processing that leads to mental model construction during generative drawing by using mobile eye-tracking technology. Examining eye-movement patterns provides evidence-based indicators of cognitive processing during learning, which helps to clarify the theoretical framework of generative drawing.

What Is the Theoretical Framework Behind Generative Drawing?

Based on Mayer, Steinhoff, Bower, and Mars's (1995) *Generative Theory of Textbook Design* (the previous version of the CTML) van Meter and Garner (2005) developed the *Generative Theory of Drawing Construction* (GTDC) - a theoretical model that describes the cognitive processes underlying drawing construction. The GTDC defines hereby learner-generated drawings as intentionally constructed pictorial representations intended to depict represented objects accurately that are described in a text. Like the CTML, the GTDC is based on the active processing assumption, that is, that learners actively engage in the cognitive processes of selection, organization, and integration in order to construct a coherent mental model.

An advantage of learner-generated drawing over instructor-provided pictures to a text is that the act of drawing forces the integration of verbal and pictorial representations: If learners

are unable to externalize some portion of a drawing the learning material might not been understood well enough and forward movement is blocked. In order to fill the missing gaps and to complete the drawing learners are forced to switch back to the text and revise their mental model (forcing function of generative drawing; van Meter & Firetto, 2013). However, it is a different situation with instructor-provided pictures: Learners may construct a verbal and visual representation, but especially learners with low prior knowledge often fail to recognize the connection between both and therefore do not fully integrate these representations into a coherent mental model (e.g., Ainsworth, Wood, & Bibby, 1998; Bodemer, Ploetzner, Feuerlein, & Spada, 2004; Seufert & Brünken, 2006).

The need to better address these recursive processes motivated van Meter and Firetto (2013) to propose the *Cognitive Model of Drawing Construction* (CMDC) - a revised and updated model of drawing construction, which retains the basic principles of the GTDC. According to the CMDC, learners form a surface representation by selecting relevant elements from the instructional material. The organization of these elements and their relations leads to a propositional representation and, by integrating the semantic information with visuo-spatial information and prior knowledge from long-term memory, to a depictive coherent mental model. The mental model has then to be translated into a perceptual image, which is a depictive surface feature representation that learners can externalize as a drawing on paper. According to the CMDC, generative drawing is not a linear sequence: Learners will undergo many recursions, driving them back and forth between various internal and external representations in order to generate a drawing. Furthermore, prior knowledge has a crucial impact on the propositional representation and on mental model construction. When an object to be drawn, for example, is described in the text as concave-shaped, students have to consult their memory in order to determine how the word “concave” can be translated into visual form (van Meter & Firetto, 2013). If learners lack this visual information, they have to construct their mental model based on the incomplete verbal representation only. Van Meter and Garner (2005) pointed out that “a learner’s prior knowledge acts as a critical, and as yet unexplored, support when using the learner-generated drawing strategy. Further research is needed to consider exactly how this prior knowledge may function as a support when learners draw” (p. 318).

What Is the Empirical Framework for Generative Drawing?

The effectiveness of drawing as a generative learning strategy has been the subject of several studies over the last 30 years (for an overview see Fiorella & Mayer, 2015 and van Meter

& Firetto, 2013). In particular, research shows that drawing is more likely to develop its full potential when the drawing process itself is instructionally supported, for instance with a toolbar showing elements that are relevant for drawing (cf., Schmeck, Mayer, Opfermann, Pfeiffer, & Leutner, 2014; Schwaborn, Mayer, Thillmann, Leopold, & Leutner, 2010). Such instructional support can reduce extraneous cognitive load that might otherwise be imposed by the mere drawing instruction.

Furthermore, the question whether drawing is beneficial for learning also depends on the accuracy or quality of the learner-generated drawings. In this regard, van Meter and Garner (2005) define drawing accuracy as “the degree to which completed drawings resemble the represented object(s)” (p. 299). Several studies that investigated generative drawing measured the relation of the quality of learners’ drawings with learning outcomes (e.g., Hall, Bailey, & Tillman, 1997; Lesgold, Good, & Levin, 1977; Schmeck et al., 2014; Schmidgall, 2017; Schwaborn et al., 2010; van Meter, 2001; van Meter, Aleksic, Schwartz, & Garner, 2006). The results of these studies show that drawing accuracy correlates positively with learning outcomes. Based on these results, Schwaborn et al. (2010; see also Leutner & Schmeck, 2014) proposed the *prognostic drawing principle*, that is, “the quality of learners’ drawings during learning predicts the quality of their learning outcomes” (p. 878).

Why Should Learners With High Expertise Show Different Learning Behavior Than Learners With Low Expertise During Generative Drawing?

To sum up at this point, generative drawing fosters generative processing that leads to deeper learning. The benefits are strong when the drawing process is instructionally supported, and, furthermore, learning success is predicted by the quality of the drawings. The latter might not be surprising as drawing quality reflects a learner’s level of understanding, that is, how well he or she was able to select relevant information from the text, to connect it with prior knowledge, and to organize it into a coherent mental model. This also means that the higher the prior knowledge is that learners bring into a learning situation, the better they should be able to engage into generative drawing. While the role of prior knowledge for processes involved in generative drawing has not been exhaustively investigated so far, prior knowledge in general and its impact on learning success, learning behavior, and processes of metacognition and self-regulation has been the focus of countless studies.

Prior knowledge is the strongest predictor of knowledge acquisition and problem solving competency (e.g., Leutner, Fleischer, & Wirth, 2006; Parkerson, Lomax, Schiller, & Walberg, 1984). Furthermore, experts show higher skills in identifying important concepts in

scientific books (Bertrand, Cellier, & Giroux, 1996) and higher self-monitoring and self-regulation skills (Chi, 2006; Huet & Mariné, 2009). Experts also show more sophisticated and suitable learning strategies (Allen, McGeorge, Pearson, & Milne, 2004; Chi, 2006; Ericsson & Lehmann, 1996; Lesgold, 1984; van Gog, Paas, & van Merriënboer, 2005), and this has been shown with regard to performance indicators as well as with regard to learning behavior, for instance by means of eye-tracking (e.g., Canham & Hegarty, 2010; Jarodzka, Scheiter, Gerjets, & van Gog, 2010). Morena, Reina, Luis, and Sabido (2002) found that expert coaches showed longer but fewer fixations than novice coaches while watching and highlighting errors in a gymnastic techniques performance. In a comparably early study, Williams, Davids, Burwitz, and Williams (1994) showed that experienced soccer players displayed different visual search strategies and fixated more often on relevant parts of the screen when asked to watch scenes of a match and anticipate pass destinations.

Specifically with regard to multimedia learning, research suggests that “experts can detect and see features that novices cannot” (Chi, 2006, p. 23). Increasing prior knowledge enables learners to better distinguish between relevant and irrelevant information and thus select the information that is most relevant for learning (Canham & Hegarty, 2010) - which at the same time is the information that is most relevant in order to create a high-quality drawing (e.g., Schwamborn et al., 2010). That is, prior knowledge affects which images and words are selected for processing in working memory and how they are organized and integrated into a coherent mental model (Braune & Foshay, 1983).

In sum, learning with text and pictures - and especially generative drawing - is assumed to be affected by prior knowledge. Learners with high prior knowledge are assumed to have more domain knowledge and more sophisticated cognitive schemas than learners with low prior knowledge. To understand new information, high-prior-knowledge learners are better able to choose appropriate schemas and develop a more abstract mental model than low-prior-knowledge learners. The latter can only process few new contents simultaneously in working memory and therefore tend to develop a superficial mental model (Cook et al., 2008; Snyder, 2000). This, in turn, should also be reflected in learning behavior and learning processes that learners with different levels of prior knowledge show during learning and drawing. For instance, learners with low prior knowledge might read a complex science text or parts of it several times in order to process the information required for their drawing in working memory adequately. On the other hand, learners with high prior knowledge should be able to distinguish more effectively between important and less important information in

the text and therefore display more strategically focused processing of the words by focusing more of their attention on relevant content.

Our study aimed at complementing existing research on the role of prior knowledge in multimedia learning. The focus is, among others, on learning processes, thus broadening traditional research that often focuses on performance measures only.

The main research questions in our study are the following:

1. Do learners with different levels of prior knowledge show different learning success when asked to generate drawings?

In line with previous findings, we expect learners with high prior knowledge to score higher on drawing accuracy and on learning outcome measures than learners with low prior knowledge.

2. Does the accuracy of the drawings correlate with posttest scores?

Following the prognostic drawing principle, we expect that the quality of the drawings will predict the quality of learning outcomes, which would indicate further evidence for the prognostic drawing principle.

3. Do experts exhibit different eye-movement patterns as indicators of cognitive processing than novices during generative drawing?

We expect learners with low prior knowledge to display overall more attentional focus on the text by rereading parts of it more often than learners with high prior knowledge. Rereading, in this regard, is expected to be an indicator that learners have not yet understood the text well enough to generate a high-quality drawing and that they are therefore forced to revise their mental model by gathering new information. We expect learners with high prior knowledge, on the contrary, to focus more on relevant content of the text, which indicates selective reading attention (Table 1). Finally, we expect both learners with high and low prior knowledge to switch regularly back to the text during drawing, indicating attempts to integrate pictorial and verbal representations with each other. However, we expect learners with high prior knowledge to be more successful in integrating drawings and corresponding text passages, indicated by a higher proportion of meaningful transitions (i.e., the proportion of transitions leading to the relevant content).

3.2 Method

Participants and Design

The participants were 26 students at a German university, who showed no eye-tracking system calibration problems or measurement errors. Their average age was 25.6 years ($SD = 3.61$). The proportion of females was 61.5%. Eleven students who studied biology were assigned to the experts group, whereas 15 students who did not study biology were assigned to the novices group. Both groups were instructed to draw pictures on paper that reflect the main elements and relations described in the text.

Materials and Apparatus

The materials were all administered in paper-and-pencil form and consisted of a demographics questionnaire, a content-related knowledge pretest, a spatial ability test, a learning booklet, a usability questionnaire, and three posttests. The demographics questionnaire solicited basic background information such as students' age, sex, and field of study. The content-related knowledge pretest (based on Schmeck et al., 2014) consisted of 19 multiple-choice items and was intended to assess students' prior knowledge about the topic of immunology (Cronbach's $\alpha = .75$). An example item is: "What are the components of an influenza-virus? (a) capsule, membrane, and antibody, (b) capsule, membrane, and glycoproteins, (c) antibody, membrane, and glycoproteins, or (d) nucleus, capsule, and membrane" [(b) is the correct answer]. The pretest covered information that was presented in the text during the learning session. To measure students' spatial ability the 10-item Paper Folding Test developed by Ekstrom, French, and Harman (1976) was used (Cronbach's $\alpha = .77$).

The learning booklet consisted of a motivational questionnaire and the learning material. After the students read the instruction for the learning material, but before they engaged in their tasks, students had to fill in a questionnaire addressing their current motivation for doing the learning task (Cronbach's $\alpha = .65$). The questionnaire consisted of eight items from the Challenge and Interest subscale of the Questionnaire on Current Motivation (FAM; Rheinberg, Vollmeyer, & Burns, 2001). The learning material included a science text that explained the causal steps of an influenza infection and the immune system's response and provides drawing prompts (adapted from Schmeck et al., 2014). The text consisted of 818 words (in German) and was divided into seven paragraphs, which were presented on seven different pages. The second paragraph, translated into English, is shown in Figure 13. Each paragraph was presented on the left side of a 29.7 x 42.0 cm (DIN A3) sheet of paper,

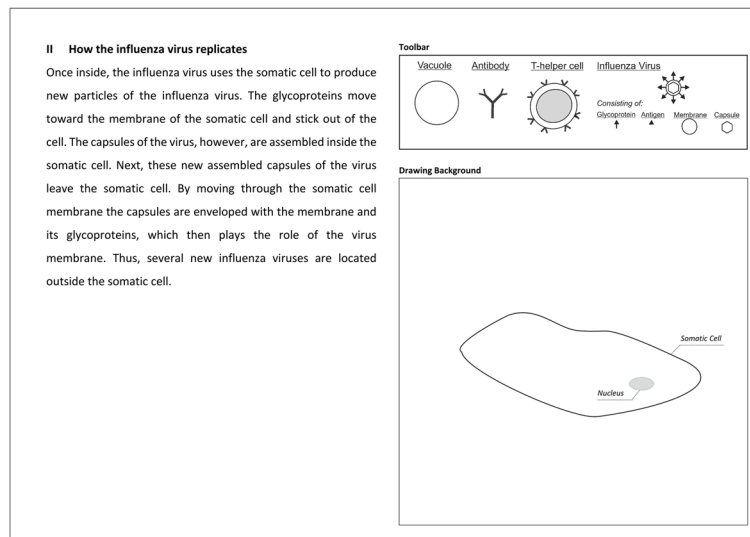


Figure 13: Second page of the immunology lesson: Example for text (left) and two-part drawing prompt (right). Note: Translated from the German original.

whereas the right side of the paper contained a drawing prompt. The drawing prompt included a legend showing all eight elements that were relevant to be included in various drawings (e.g., a template for an influenza virus) and a partly pre-drawn background on which the drawing had to be generated. Providing a drawing prompt that includes a legend showing all relevant elements for drawing and a pre-drawn background is intended to leave enough cognitive capacity for learners to make sense of the text and benefit from the drawing strategy (Leutner, Leopold, & Sumfleth, 2009; Schwamborn et al., 2010).

The usability questionnaire (Cronbach's $\alpha = .78$) was developed by the first author and assessed whether the eye-tracking glasses affected participants' performance. Students were asked to rate on a scale from "(1) does not apply" to "(7) does apply" whether the eye-tracking glasses made them move unnaturally, made them feel unwell, and disturbed or restricted them during learning with the text and graphics.

The three posttests intended to assess learning outcomes were a retention posttest, a transfer posttest, and a drawing posttest (based on Schmeck et al., 2014). The retention posttest (Cronbach's $\alpha = .84$) consisted of 19 multiple-choice items (the same items as in the content-related knowledge pretest) and measured students' retention of facts and concepts in the text. The transfer posttest consisted of nine multiple-choice items (Cronbach's $\alpha = .65$) addressing the ability to apply the learned information to new situations. An example item is: "T-helper cells recognize not only viruses, but also agents that are extraneous to the body. Which medication would you administer to a patient, who has received a new kidney? (a) a medicine that suppresses the immune response to the body, (b) a medicine that activates the immune response of the body, (c) a medicine that contains antigens, or (d) a

medicine that contains blood of the kidney donor” [(a) is the correct answer]. The drawing test consisted of four items asking students to reproduce the main ideas in the text by drawing sketches depicting key concepts of the text and their spatial relations. An item example for the drawing test is: “Sketch the binding between influenza viruses and appropriate antibodies.”

To record the participants’ eye movements during learning an SMI mobile eye-tracking glasses system (SMI ETG 1.5) with a sampling rate of 30 Hz was used. One advantage of having participants wear mobile eye-tracking glasses (in contrast to sitting at a screen monitored by a stationary eye tracker) is that students could be in their natural sitting position and move their heads freely around while learning. SMI’s BeGaze software (version 3.7) was used for fixation and saccade detection. We also used a drafting table in order to help students handle the big paper format. Another advantage of the drafting table is that the angle between the learning material and participants’ eyes could be optimized in order to reduce measurement errors (Holmqvist et al., 2011).

Procedure

The participants were tested at our laboratory in individual learning sessions. The students filled in the demographics questionnaire and the content-related knowledge pretest at their own rate. After they had finished, the experimenter gave instructions for the Paper Folding Test, for which the students had a three-minute time limit.

Then the actual individual learning sessions were held. First, the experimenter explained the eye-tracking equipment, asked the student to put on the eye-tracking glasses, and proceeded with a three-point eye-tracking calibration for the participant. Second, the student received written and spoken instructions on how to proceed. Third, the student was handed the learning booklet. Each student was provided with a pen, a pencil, an eraser, and several highlighters with the spoken instruction to use whatever he or she needed. After these instructions, the student was asked to complete the motivation questionnaire. Next, the participant started learning with the material while his or her eye movements were recorded. The reason why participants had to wear the eye-tracking glasses before they started learning with the text was, on the one hand, to give students time to get used to the eye-tracking glasses and, on the other hand, to allow the experimenter to supervise the eye-tracking accuracy and to recalibrate if necessary.

Both groups, experts and novices, were instructed to carefully read the text paragraph by paragraph in order to comprehend the biological topic and to make a clear and simple drawing for each of the seven paragraphs representing its main ideas. They were also advised to use the pictorial templates given in the legend and to draw on the pre-drawn backgrounds. Both groups were told that after learning they would be asked questions about what was learned. Learning time was measured individually. After the student finished the learning task, the eye-tracking glasses were removed. Then the usability questionnaire was given, in which the student rated whether the eye-tracking glasses affected his or her learning behavior.

The last stage was to complete the three posttests, which consisted of the retention posttest, the transfer posttest, and the drawing posttest. Students worked at their own rate and did neither have access to the text nor to the generated drawings. Upon completion, each student was thanked, debriefed, and dismissed. We followed guidelines for ethical treatment of human subjects and had each students' approval for the study.

Scoring of the Paper-Based Materials

To assess the drawing accuracy score, a revised coding scheme adapted from Schmeck et al. (2014) was used. It is based on university-level biology instructor's drawings and a checklist specifying important relational features of the drawings. Students received points when they identified critical elements representing the main ideas of each text paragraph and constructed pictures by drawing each of those elements correctly and spatially correct on the pre-drawn background. For example, one important aspect in the second paragraph is that there are several new influenza viruses located outside the somatic cell after the replication process. Students received two points if their drawing included at least two correctly sketched influenza viruses (including capsule, membrane, and glycoproteins) outside the somatic cell. They received one point if only one correct influenza virus was sketched. Students had to draw seven pictures in total, one picture for each text paragraph. Maximum drawing accuracy was scored with 32.5 points. The first author and a student assistant (teacher trainee) scored the quality for each of the seven drawings for each student with an intraclass correlation of $ICC_{unjust} = .94$.

A maximum of 19 points was possible for the content-related knowledge pretest and for the retention posttest, one point for each correctly answered item. The transfer posttest contained nine multiple-choice items, and students scored one point for each correct answer, yielding a total possible of 9 points. Similar to the drawing accuracy score during learning, the score

for the drawing posttest was received by counting the total number of correct main ideas in each student's answer across the four drawing items based on an adapted and revised coding scheme from Schmeck et al. (2014). Students could earn a maximum of 20 points. Again, the drawing accuracy was scored by the first author and a student assistant with an intraclass correlation of $ICC_{unjust} = .96$.

The Paper Folding Test was scored by adding up the number of correctly answered items and subtracting one point for each incorrectly answered item, with no points for unanswered items.

Measurement of Eye Movement Behavior

To analyze eye movement data, we established areas of interest (AOIs). An AOI is a defined region on a stimulus, in which eye movements (such as fixations and saccades) are analyzed separately (Holmqvist et al., 2011). We used SMI's gaze analysis software for eye-tracking data (BeGaze, version 3.7) to create two main AOIs for each of the seven pages: One covered the drawing prompt on the right side of the page (workspace AOI) and the other one covered the whole text paragraph on the left side of the page (text AOI). Furthermore, within each text AOI, we defined further AOIs covering the most important content of each paragraph (important-text AOI), as shown in Figure 14. The determination of the most important content of each paragraph was done in collaboration with a biology teacher.

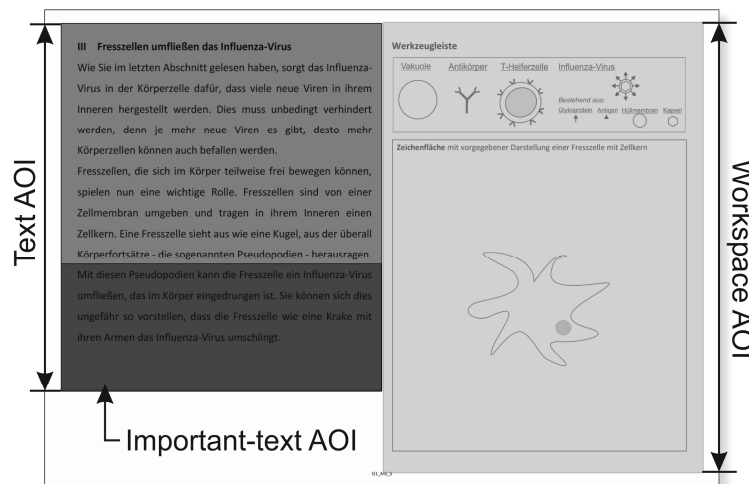


Figure 14: Areas of interests (AOIs) for the third page of the immunology lesson. On the left side is the text AOI (with the important-text AOI included in the lower part), and on the right side is the workspace AOI.

We focus on four key eye-tracking metrics that yield theoretically useful information concerning indicators of cognitive processing: *rereadings*, *focused fixation time*, *transition rate*, and *meaningful transitions* (as shown in Table 1). The number of fixations per word inside

the text AOIs (which we name *rereadings*) is computed as the total number of fixations inside the text AOIs divided by the total number of words in the text AOIs, and provides a measure of intentional focus on the text. The purpose of the measure is to quantify how much of the text has been read and how carefully. If the entire text is read once, a value about 0.8 is expected, because, due to chunking, not all words are fixated. If participants read the text or parts of the text several times the value is expected to be higher (Holmqvist et al., 2011; Poole, Ball, & Phillips, 2005). Attending to the relevant information in the text - or in other words: selecting - is the first step in meaningful learning. Thus, *focused fixation time* is computed as the sum of all fixation durations on the important-text AOIs divided by the sum of all fixation durations on the text AOIs, and provides a measure of learners' selective reading attention. The number of times eye fixations move from the workspace AOIs to the text AOIs per minute (which we name *transition rate*) provides a measure of the attempts to integrate drawings and words (e.g., Schmidt-Weigand, Kohnert, & Glowalla, 2010). The proportion of *meaningful transitions* is computed as the total number of transitions from the workspace AOIs to the important-text AOIs divided by the total number of transitions from the workspace AOIs to the text AOIs, and provides a measure of the proportion of meaningful attempts to integrate visualizations with corresponding text passages (e.g., Johnson & Mayer, 2012).

3.3 Results

Are the Groups Equivalent on Basic Characteristics?

The first step of data analysis was to determine whether the groups differed on basic characteristics. A chi-square analysis indicates that experts and novices do not differ significantly in the proportion of boys and girls, $\chi^2(1) = 3.31$, $p = .069$. Mann-Whitney-U tests indicate that there are no significant differences between the experts and novices in age, $U = 81.50$, $z = -0.05$, $p = .959$, motivation, $U = 111.00$, $z = 1.59$, $p = .148$, eye-tracking usability, $U = 63.50$, $z = -1.07$, $p = .330$, spatial ability, $U = 119.50$, $z = 1.96$, $p = .054$, and learning time in minutes, $U = 70.00$, $z = -0.65$, $p = .540$. We conclude that the groups do not differ on basic characteristics.

Do Both Groups Differ in Prior Knowledge?

Before testing the hypotheses, we analyzed whether the groups differ in prior knowledge (as a quasi-experimental manipulation check). The first row of Table 4 shows medians, means,

and standard deviations of the experts group and the novices group on the content-related knowledge pretest, respectively. As the data for the pretest is not normally distributed, a non-parametric test was used to investigate group differences. As expected, the experts group have significantly more prior knowledge about the topic of immunology than the novices group, yielding a large effect size, $U = 158.50$, $z = 4.01$, $p < .001$, $r = .79$. We conclude that the groups differ significantly in prior knowledge before engaging in the learning task.

Table 4: Medians, Means, and Standard Deviations of Two Groups on Prior Knowledge, Drawing Accuracy During Learning, and Three Learning Outcome Measures.

Measure	Group						<i>r</i>
	Novices			Experts			
	<i>Mdn</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Mdn</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
Prior knowledge							
Content-related knowledge pretest (% correct)	42.11	41.75	13.71	78.95	73.68	11.29	.79***
Learning outcomes							
Drawing accuracy (% correct)	78.46	73.95	16.99	93.85	92.45	7.71	.62**
Retention test (% correct)	89.47	82.81	19.23	100	96.17	5.31	.41*
Transfer test (% correct)	77.78	74.07	20.43	100	94.95	5.80	.60**
Drawing test (% correct)	82.50	75.83	18.07	92.50	90.91	9.51	.51**

* $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$.

Do Learners With Different Levels of Prior Knowledge Show Differences in Learning Success When Asked to Generate Drawings?

Our basic research questions concern whether students with high prior knowledge generate higher-quality drawings than learners with low prior knowledge during learning and whether both groups differ in learning outcome performance. As the experts have a more complex and elaborate network of prior knowledge than the novices, we predict that the experts will score higher on drawing accuracy during learning and on learning outcome measures. The bottom portion of Table 4 shows medians, means, and standard deviations of the experts group and the novices group on drawing accuracy, retention posttest, transfer posttest, and drawing posttest, respectively. Considering the small number of participants, non-parametric tests were used for all analyses.

The mean proportion correct on drawing accuracy during learning is 81.78% ($SD = 16.50$). A Mann-Whitney test reveals that the experts group scores significantly higher than the nov-

ices group on drawing accuracy, $U = 143.00$, $z = 3.15$, $p = .001$, $r = .62$, indicating that experts developed a more abstract mental model than novices, which holds primary responsibility for generating higher-quality drawings during learning.

As expected, the experts group scores significantly higher than the novices group on the retention posttest, $U = 121.00$, $z = 2.07$, $p = .047$, $r = .41$, transfer posttest, $U = 139.00$, $z = 3.05$, $p = .002$, $r = .60$, and drawing posttest, $U = 132.50$, $z = 2.62$, $p = .008$, $r = .51$, yielding medium to large effect sizes. However, looking at the differences between content-related knowledge pretest and retention posttest, the novices group gained significantly more knowledge (increase by $Mdn = 42.11$ percentage points) than the experts group (increase by $Mdn = 21.05$ percentage points), yielding a large effect size, $U = 29.00$, $z = -2.79$, $p = .004$, $r = .55$.

We conclude that students in the experts group have more prior knowledge about the topic of immunology than students in the novices group and that the experts group was able to maintain that lead in knowledge through tests of learning outcomes. The experts were also able to generate drawings of higher quality, indicating the development of a more elaborated mental model during learning. However, novices showed a larger increase in knowledge than experts from pretest to posttest as measured by parallel items for retention.

Does The Quality of Learner-Generated Drawings Predict Learning Outcomes?

A further research question concerns whether the quality of drawings is related to performance in tests of learning outcomes. A Spearman correlation analysis reveals that drawing accuracy during learning correlate significantly with retention posttest, $r_s = .56$, $p = .003$, with transfer posttest, $r_s = .74$, $p < .001$, and with drawing posttest, $r_s = .58$, $p = .002$. These findings provide further evidence for the prognostic drawing principle (Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn et al., 2010), which states that the quality of students' drawings during learning from science texts is predictive of learning outcomes.

Do Experts Exhibit Different Eye-Movement Patterns as Indicators of Cognitive Processing than Novices during Generative Drawing?

Having established that the experts group performs better on learning outcome posttests than the novices group, the major new focus of the present study is to examine how the level of expertise affects cognitive processing during generative drawing, indicators of which we examine through eye-tracking measures.

Table 5: Medians, Means, and Standard Deviations of Two Groups on Four Indicators of Cognitive Processing.

Measure	Group						<i>r</i>
	Novices			Experts			
	<i>Mdn</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Mdn</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
Rereadings	2.59	2.66	0.59	2.17	2.20	0.51	.39*
Focused fixation time (%)	59.29	58.75	4.31	64.02	62.91	5.73	.39*
Transition rate	2.92	2.75	0.89	2.57	2.33	0.88	.25
Meaningful transitions (%)	61.22	59.15	10.99	66.67	63.22	12.09	.25

* $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$.

Table 5 shows medians, means, and standard deviations of the experts group and the novices group on eye-tracking measures of rereading, focused fixation time, transition rate, and meaningful transitions. Our major prediction is that experts will score significantly higher than novices on each of these indices of cognitive processing during learning. Considering the small number of participants, non-parametric tests were used for all analyses.

A Mann-Whitney test shows that novices read and reread the text significantly more often than experts, $U = 44.00$, $z = -2.00$, $p = .047$, $r = .39$, indicating more careful reading. In line with this result, a Mann-Whitney test reveals that the experts score significantly higher than the novices on proportion of focused fixation time, $U = 121.00$, $z = 2.00$, $p = .047$, $r = .39$, indicating better focusing on key elements of the text. There are no significant differences, however, between the groups on transition rate, $U = 58.00$, $z = -1.27$, $p = .217$, $r = .25$, and on meaningful transitions, $U = 107.50$, $z = 1.30$, $p = .198$, $r = .25$, indicating that both groups display equal attempts to engage in integrating visualizations and corresponding text as well as equal success in doing so.

The study was designed to provide information from experts and novices on cognitive processing during generative drawing that leads to mental model construction by analyzing eye-movement patterns. In particular, the eye movement analysis shows that novices displayed overall more attentional focus on the text (as indicated by rereadings), whereas experts displayed more strategically focused processing of the text by focusing more of their attention on relevant content (as indicated by focused fixation time). Both groups, however, engaged comparably in making connections between their drawings and the text (as indicated by transition rate) and both groups show a high probability of successful integrations (as indicated by the proportion of meaningful transitions). These indicators of cognitive processing during generative drawing represent the primary new findings of the present study.

3.4 Discussion

Empirical Contributions

Our study aimed at shedding more light onto the question, how the benefits of drawing as a generative learning strategy can be explained in terms of underlying cognitive processes and whether these processes can be made more tangible by comparing the learning behavior of learners with high and low prior knowledge. In this regard, the primary empirical contribution of this study is that the experts group create drawings of significantly higher quality during learning, score higher on all learning outcome measures, and display different indicators of cognitive processing (as measured by eye-tracking metrics) than the novices group. In particular, the experts group had fewer fixations per word inside the text AOIs, but had a higher proportion of focused fixation time on important content than the novices group. Both groups did not differ in transitions per minute and the proportion of meaningful transitions between their drawings and the text.

Overall, the accuracy of learner-generated drawings correlates with all learning outcome measures significantly. Based on these findings, we concur with the prognostic drawing principle: “The quality of learners’ drawings during learning predicts the quality of their learning outcomes” (Schwamborn et al., 2010, p. 878; see also Leutner & Schmeck, 2014).

Theoretical Contributions

The present study contributes to evaluating the theoretical framework of generative drawing with regard to the impact of prior knowledge on mental model construction by using mobile eye-tracking technology. Consistent with the CMDC, the present study shows that prior knowledge affects cognitive processing, which is crucial for mental model construction. Contrary to mere performance measures that are usually gained after learning (such as drawing accuracy or learning outcomes) and that only allow for a limited interpretation with regard to underlying cognitive processes, we used eye-tracking as a more direct measure of indicators of cognitive processing. The eye-movement patterns show that learners with high prior knowledge were better able to distinguish between important and less important information in the text and spent more time focusing on relevant content than the learners with low prior knowledge, which indicates more profound selection processing. The higher re-reading frequency of low prior knowledge learners indicates that they were less able to understand the text immediately (which is in line with expectations concerning novices’ versus experts’ ease of comprehension).

Although the experts group focused more on relevant text content, both groups did not differ in making meaningful connections between their drawings and corresponding text passages, which could be due to two reasons. First, the higher level of prior knowledge might have enabled the experts to keep the relevant textual information long enough in their working memory to draw without having the need to switch back to the corresponding words in the text more often. A second and simpler explanation might be the difficulty of the text: Even novices scored comparatively high on drawing accuracy during learning and on the three posttests. In other words, although experts showed significantly better performance on all these scores, novices still scored quite well in drawing accuracy during learning and in learning outcome measures. This could mean that the text itself was not as complex as to require very sophisticated organization and integration activities, so that novices and experts show rather equal scores with regard to transition rate and meaningful transitions.

However, although not fully expected, this finding is not necessarily discouraging. On the contrary, if a text is readable and comprehensible enough to help novices in drawing pictures of high quality without extensively having to switch back and forth between their drawing-in-progress and corresponding text passages, and if the text accordingly enables novices to achieve a retention score that is almost twice as high as their pretest score, this speaks in favor of the quality of the learning materials that obviously helped novices to catch up quite well on the gap between them and the experts.

In sum, our findings firstly add to existing theories on the benefits of generative drawing, and, secondly, they move beyond research that has been conducted so far by comparing learning activities and behavior of experts and novices to shed more light on the underlying cognitive processes that are involved in learning with science texts as well as in generative drawing.

Practical Contributions

In line with previous research, our study shows the benefits of generative drawing as a generative learning strategy that can foster deep cognitive processing during learning and thus improves learning outcomes. Furthermore, this study points out that generative drawing is a strategy that is suitable for novices and helps them catching up with the knowledge that experts already possess before learning to a certain extent.

Limitations and Future Directions

First, although we compared experts' and novices' learning, we should note that the performance of both groups was rather high in general. It might thus well be that some kind of ceiling effect occurred during learning, which in turn might have prevented some of the differences (e.g., meaningful transitions between textual and pictorial information) from becoming significant on a .05 level or reaching larger effect sizes.

Second, it is important to note that there was no classical text-only control group in our study. This is because the effectiveness of generative drawing has already been demonstrated in a number of previous studies, which included a text-only control group (e.g., Schmeck et al., 2014; for an overview see Leutner & Schmeck, 2014 and Fiorella & Mayer, 2015). Instead, our intention was to gain more insight in why the strategy works so well. On the other hand, however, it might be worth thinking about investigating whether experts versus novices benefit differently from different instructional designs and/or learning strategies.

Third, although we used eye-tracking methodology as an advanced means to gain insights into cognitive processing that go well beyond pure performance measures, the results should still be taken with care. While the analysis of eye movements during learning allows for a more precise look on learning behavior as an indicator of learning processes, the eye-tracking data does not allow conclusions on learners' success or failure of comprehending the relevant information (Hyönä, 2010) or, in particular, what learners are thinking while performing their tasks (Holsanova, Holmberg, & Holmqvist, 2008; Triesch, Ballard, Hayhoe, & Sullivan, 2003). In this regard, it might be fruitful to add respective measures to future research, such as retrospective verbalizations (i.e., recording think-aloud *after* the task is performed). Participants can thereby verbalize their thought processes during task performance by viewing their own scene videos with own eye movements superimposed onto it (e.g., Jarodzka et al., 2010; van Gog, Paas, van Merriënboer, & Witte, 2005; van Gog & Scheiter, 2010).

Finally, more work is needed to determine how novices can benefit from experts' cognitive processing during generative drawing. Research in the area of medical expertise acquisition, for example, showed that studying eye movement modeling examples had positive effects on performance, task-relevant fixations, and the use of cognitive and metacognitive comprehension strategies (Gegenfurtner, Lehtinen, Jarodzka, & Säljö, 2017). In this regard, future research in generative drawing might, for example, focus on the benefit of providing novices

with information on the eye-movement patterns and learning behavior of experts when reading and drawing during working with complex science texts in order to benefit even more from generative drawing.

Overall, the present study provides further evidence for the benefits of generative drawing as an effective and beneficial learning strategy that is suitable for both learners with high and low prior knowledge. As eye-tracking methodology allows more direct measures of online indicators of cognitive processing than learning outcome tests, our results grant deeper insight into the underlying cognitive processes of experts and novices during learning with text and self-generated drawings.

3.5 References

- Ainsworth, S., Wood, D. J., & Bibby, P. A. (1998). Analysing the costs and benefits of multi-representational learning environments. In M. W. van Someren, H. P. A. Boshuizen, T. de Jong, & P. Reimann (Eds.), *Learning with multiple representations* (pp. 120–134). Oxford: Elsevier Science.
- Allen, R., McGeorge, P., Pearson, D., & Milne, A. B. (2004). Attention and expertise in multiple target tracking. *Applied Cognitive Psychology*, 18, 337–347.
<https://doi.org/10.1002/acp.975>
- Baddeley, A. D. (1999). *Essentials of human memory. Cognitive psychology*. Hove: Psychology Press.
- Bertrand, A., Cellier, J.-M., & Giroux, L. (1996). Expertise and strategies for the identification of the main ideas in document indexing. *Applied Cognitive Psychology*, 10, 419–433. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0720\(199610\)10:5<419::AID-ACP401>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0720(199610)10:5<419::AID-ACP401>3.0.CO;2-W)
- Bodemer, D., Ploetzner, R., Feuerlein, I., & Spada, H. (2004). The active integration of information during learning with dynamic and interactive visualisations. *Learning and Instruction*, 14, 325–341. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.06.006>
- Braune, R., & Foshay, W. R. (1983). Towards a practical model of cognitive/information processing task analysis and schema acquisition for complex problem-solving situations. *Instructional Science*, 12, 121–145. <https://doi.org/10.1007/BF00122453>
- Canham, M., & Hegarty, M. (2010). Effects of knowledge and display design on comprehension of complex graphics. *Learning and Instruction*, 20, 155–166.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.014>
- Chi, M. T. H. (2006). Two approaches to study of experts' characteristics. In N. Charness & Feltovich, Paul J., Hoffman, Robert R., Ericsson, K. Anders (Eds.), *The Cambridge handbook of expertise and expert performance* (pp. 21–30). New York, NY: Cambridge University Press.
- Cook, M., Carter, G., & Wiebe, E. N. (2008). The interpretation of cellular transport graphics by students with low and high prior knowledge. *International Journal of Science Education*, 30, 239–261. <https://doi.org/10.1080/09500690601187168>
- Ekstrom, R. B., French, J. W., & Harman, H. H. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests*. Princeton, NJ: Educational Testing Service.

- Ericsson, K. A., & Lehmann, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology*, 47, 273–305. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.47.1.273>
- Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity: Eight learning strategies that promote understanding*. New York: Cambridge University Press.
- Gegenfurtner, A., Lehtinen, E., Jarodzka, H., & Säljö, R. (2017). Effects of eye movement modeling examples on adaptive expertise in medical image diagnosis. *Computers & Education*, 113, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.06.001>
- Hall, V. C., Bailey, J., & Tillman, C. (1997). Can student-generated illustrations be worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 89, 677–681. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.4.677>
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & van de Weijer, Joost. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press.
- Holsanova, J., Holmberg, N., & Holmqvist, K. (2008). Reading information graphics: The role of spatial contiguity and dual attentional guidance. *Applied Cognitive Psychology*, 23, 1215–1226. <https://doi.org/10.1002/acp.1525>
- Huet, N., & Mariné, C. (2009). Expertise and self-regulation processes in a professional task. *Applied Cognitive Psychology*, 23, 1027–1041. <https://doi.org/10.1002/acp.1540>
- Hyönä, J. (2010). The use of eye movements in the study of multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20(2), 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.013>
- Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P., & van Gog, T. (2010). In the eyes of the beholder: How experts and novices interpret dynamic stimuli. *Learning and Instruction*, 20, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.019>
- Johnson, C. I., & Mayer, R. E. (2012). An eye movement analysis of the spatial contiguity effect in multimedia learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18, 178–191. <https://doi.org/10.1037/a0026923>
- Lesgold, A. M. (1984). Acquiring expertise. In J. R. Anderson & S. M. Kosslyn (Eds.), *Tutorials in learning and memory: Essays in honor of Gordon Bower* (pp. 31–60). San Francisco: Freeman.
- Lesgold, A. M., Good, H. de, & Levin, J. R. (1977). Pictures and young children's prose learning: A supplementary report. *Journal of Literacy Research*, 9, 353–360. <https://doi.org/10.1080/10862967709547240>

- Leutner, D., Fleischer, J., & Wirth, J. (2006). Problemlösekompetenz als Prädiktor für zukünftige Kompetenz in Mathematik und in den Naturwissenschaften [Problem-solving competence as a predictor of future competence in mathematics and science education]. In M. Prenzel, J. Baumert, W. Blum, R. Lehmann, D. Leutner, M. Neubrand, . . . U. Schiefele (Eds.), *PISA 2003: Untersuchungen zur Kompetenzentwicklung im Verlauf eines Schuljahres* (pp. 119–137). Münster: Waxmann.
- Leutner, D., Leopold, C., & Sumfleth, E. (2009). Cognitive load and science text comprehension: Effects of drawing and mentally imagining text content. *Computers in Human Behavior*, 25, 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.12.010>
- Leutner, D., & Schmeck, A. (2014). The generative drawing principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 433–448). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2014a). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 43–71). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (Ed.). (2014b). *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E., Steinhoff, K., Bower, G., & Mars, R. (1995). A generative theory of textbook design: Using annotated illustrations to foster meaningful learning of science text. *Educational Technology Research and Development*, 43, 31–41. <https://doi.org/10.1007/BF02300480>
- Morena, F. J., Reina, R., Luis, V., & Sabido, R. (2002). Visual search strategies in experienced and inexperienced gymnastic coaches. *Perceptual and Motor Skills*, 95, 901–902. <https://doi.org/10.2466/PMS.95.7.901-902>
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford: Oxford University Press.
- Paivio, A. (2006). *Mind and its evolution: A dual coding theoretical approach*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Parkerson, J. A., Lomax, R. G., Schiller, D. P., & Walberg, H. J. (1984). Exploring causal models of education achievement. *Journal of Educational Psychology*, 76, 638–646. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.76.4.638>

- Pintrich, P. R. (2000). The role of goal orientation in self-regulated learning. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, & M. Zeidner (Eds.), *Handbook of self-regulation* (pp. 451–502). San Diego: Academic Press.
- Poole, A., Ball, L. J., & Phillips, P. (2005). In search of salience: A response-time and eye-movement analysis of bookmark recognition. In S. Fincher, P. Markopoulos, D. Moore, & R. Ruddle (Eds.), *People and computers XVIII - Design for life: Proceedings of HCI 2004* (pp. 363–378). London: Springer. https://doi.org/10.1007/1-84628-062-1_23
- Rey, G. D. (2010). Multimedia learning: Are we still asking the wrong questions? *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 19, 103–120.
- Rheinberg, F., Vollmeyer, R., & Burns, B. D. (2001). FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen [QCM: A questionnaire to assess current motivation in learning situations]. *Diagnostica*, 47, 57–66.
- Schmeck, A., Mayer, R. E., Opfermann, M., Pfeiffer, V., & Leutner, D. (2014). Drawing pictures during learning from scientific text: Testing the generative drawing effect and the prognostic drawing effect. *Contemporary Educational Psychology*, 39, 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2014.07.003>
- Schmidgall, S. P. (2017). Drawing to learn: Investigating the role of contributing factors and instructional support for learner-generated drawing (Dissertation). Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen, Germany.
- Schmidt-Weigand, F., Kohnert, A., & Glowalla, U. (2010). A closer look at split visual attention in system- and self-paced instruction in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.011>
- Schnotz, W. (2014). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 72–103). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>
- Schwamborn, A., Mayer, R. E., Thillmann, H., Leopold, C., & Leutner, D. (2010). Drawing as a generative activity and drawing as a prognostic activity. *Journal of Educational Psychology*, 102, 872–879. <https://doi.org/10.1037/a0019640>
- Seufert, T., & Brünken, R. (2006). Cognitive load and the format of instructional aids for coherence formation. *Applied Cognitive Psychology*, 20, 321–331. <https://doi.org/10.1002/acp.1248>

- Snyder, J. L. (2000). An investigation of the knowledge structures of experts, intermediates and novices in physics. *International Journal of Science Education*, 22, 979–992.
<https://doi.org/10.1080/095006900416866>
- Triesch, J., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Sullivan, B. T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, 3, 86–94. <https://doi.org/10.1167/3.1.9>
- van Gog, T., Paas, F. G., & van Merriënboer, J. J. G. (2005). Uncovering expertise-related differences in troubleshooting performance: Combining eye movement and concurrent verbal protocol data. *Applied Cognitive Psychology*, 19, 205–221.
<https://doi.org/10.1002/acp.1112>
- van Gog, T., Paas, F. G., van Merriënboer, J. J. G., & Witte, P. (2005). Uncovering the problem-solving process: Cued retrospective reporting versus concurrent and retrospective reporting. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11, 237–244.
<https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.4.237>
- van Gog, T., & Scheiter, K. (2010). Eye tracking as a tool to study and enhance multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20, 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.009>
- van Meter, P. (2001). Drawing construction as a strategy for learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 93, 129–140. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.93.1.129>
- van Meter, P., Aleksic, M., Schwartz, A., & Garner, J. (2006). Learner-generated drawing as a strategy for learning from content area text. *Contemporary Educational Psychology*, 31, 142–166. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2005.04.001>
- van Meter, P., & Firetto, C. M. (2013). Cognitive model of drawing construction: Learning through the construction of drawings. In G. J. Schraw, M. T. McCrudden, & D. R. Robinson (Eds.), *Current perspectives on cognition, learning, and instruction. Learning through visual displays* (pp. 247–380). Charlotte, N.C.: Information Age Publishing.
- van Meter, P., & Garner, J. (2005). The promise and practice of learner-generated drawing: Literature review and synthesis. *Educational Psychology Review*, 17, 285–325.
<https://doi.org/10.1007/s10648-005-8136-3>
- Williams, A. M., Davids, K., Burwitz, L., & Williams, J. G. (1994). Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 65, 127–135. <https://doi.org/10.1080/02701367.1994.10607607>

4 Zusammenfassende Diskussion

Wenn Lernenden Informationen nicht nur in Form eines komplexen Sachtextes, sondern zusätzlich auch in einer anderen Repräsentationsform – wie z. B. einer Abbildung – zur Verfügung gestellt werden, kann dies zu einem erhöhten Textverständnis führen (z. B. Butcher, 2014; Mayer, 2009, 2014a). Allerdings gibt es auch Hinweise darauf, dass Lernenden häufig das Wissen fehlt, Abbildungen richtig zu lesen, sodass beim Betrachten der Abbildungen Bilddetails übersehen werden und dementsprechend das Bildverständnis nur oberflächlicher Natur ist (z. B. Brandstetter, Sandmann & Florian, 2017; Cheng & Gilbert, 2014). Eine Alternative bietet die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens, bei der Lernende selbst für die Erstellung geeigneter repräsentationaler Abbildungen verantwortlich sind. Die Lernenden müssen sich bei der Erstellung einer Abbildung intensiv mit den einzelnen Elementen und ihren Zusammenhängen auseinandersetzen, indem sie wesentliche Informationen aus dem zugehörigen Text selektieren, organisieren und mit ihrem Vorwissen und der sich in der Entstehung befindenden Abbildung integrieren.

Die in dieser Arbeit vorgestellten drei experimentellen Studien haben sich schwerpunktmäßig mit den in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen (siehe Kapitel 1.2.1 und 1.2.2) angenommen zugrundeliegenden kognitiven Verarbeitungsprozessen während des Zeichnens auseinandergesetzt. Der Fokus lag dabei auf der Analyse der Blickbewegungen der Lernenden bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens, anhand derer Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse ausgemacht wurden. In allen drei Studien wurde untersucht, ob die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens Lernende verstärkt dazu anregt, ihre Aufmerksamkeit beim Lesen des Textes gezielt auf die zentralen Textpassagen zu richten. Weiterhin wurde überprüft, ob Lernende durch den Zeichenprozess verstärkt dazu angeregt werden, sinnstiftende Verknüpfungen zwischen ihrer sich in der Entstehung befindenden Zeichnung und den zentralen Textpassagen herzustellen. In der ersten und zweiten Studie lag daher der Fokus auf der Frage, ob die für das sinnstiftende Zeichnen gefundenen Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse typisch für die Zeichenstrategie sind oder ob sich diese Blickbewegungsmuster auch beim Bearbeiten einer multimedialen Lernumgebung (bestehend aus einem Text und vorgegebenen Abbildungen) oder der Anwendung der Lernstrategie des Zusammenfassens wiederfinden lassen. In der dritten Studie ging es schließlich um die Frage, inwiefern das Vorwissen Einfluss auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse während des Zeichnens hat, die zur Kon-

struktion eines komplexen mentalen Modells führen. Dazu wurden die Blickbewegungsmuster Lernender mit hohem und geringem Vorwissen bei der Ausführung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens analysiert.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Wirksamkeit des sinnstiftenden Zeichnens. In der ersten und zweiten Studie wurde daher untersucht, ob Lernende, welche die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, ein höheres Textverständnis erwerben als Lernende, die nur vorgegebene Abbildungen zu einem Text erhalten (Studie I) oder die Lernstrategie des Zusammenfassens ausführen (Studie II). Darüber hinaus wurde in allen drei Studien untersucht, ob die Qualität der bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens erstellten Zeichnungen als Prädiktor für den Lernerfolg dient und somit weitere empirische Nachweise zur Gültigkeit des *prognostic drawing principles* (Schwamborn, Mayer, Thillmann, Leopold & Leutner, 2010; siehe auch Leutner & Schmeck, 2014) erbracht werden können.

4.1 Zentrale Ergebnisse

Bezogen auf die in dieser Arbeit formulierten Forschungsfragen (siehe Kapitel 1.4) zeigen sich die folgenden zentralen Ergebnisse:

4.1.1 Zentrale Ergebnisse der ersten Studie

1. Inwiefern unterscheiden sich Lernende, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von Lernenden, welche vorgegebene Abbildungen zu einem Text erhalten, im Hinblick auf den Lernerfolg?

In der ersten Studie erhielten Lernende neben einem Sachtext zur Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren entweder die Instruktion abschnittsweise sinnstiftende Zeichnungen zu erstellen oder mithilfe des Textes und vorgegebener Abbildungen zu lernen. Ausgehend von den Ergebnissen von Schmeck, Mayer, Opfermann, Pfeiffer und Leutner (2014) wurde erwartet, dass die Lernenden mit Zeicheninstruktion besser in den drei eingesetzten Posttests zur Erfassung der Behaltensleistung, der Transferleistung und der Reproduktionsleistung der zentralen Aspekte des Textes in Form von skizzenhaften Zeichnungen abschneiden als Lernende, die mit dem Text und vorgegebenen Bildern lernten. Die Ergebnisse des Behaltens- und Zeichentests zeigen, dass Lernende, welche sinnstiftende Zeichnungen zu einem Text erstellten, ein höheres Textverständnis erwarben als Lernende,

die nur mit dem Text und vorgegebenen Bildern lernten. In der Transferleistung unterschieden sich die beiden Lerngruppen allerdings nicht. Zusammengefasst weisen die Ergebnisse der Lernerfolgstests auf einen positiven Nutzen des Einsatzes der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens im Hinblick auf das Textverständnis hin.

2. Inwiefern prognostiziert die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen den Lernerfolg der Lernenden, welche die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden?

Das *prognostic drawing principle* (Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn, Mayer et al., 2010) besagt, dass die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen prädiktiv für den Lernerfolg ist. Die Ergebnisse der ersten Studie zeigen, dass ein statistisch bedeutsamer positiver Zusammenhang zwischen der Qualität der während des Lernens erstellten Zeichnungen und den anschließenden Lernerfolgstests besteht: Lernende, die qualitativ hochwertige Zeichnungen erstellten, wiesen auch in allen drei Lernerfolgsmaßen hohe Testleistungen auf. Somit konnte ein weiterer empirischer Beleg für die Gültigkeit *des prognostic drawing principles* erbracht werden.

3. Inwiefern unterscheiden sich die Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von denen der Lernenden, die vorgegebene Abbildungen zu einem Text erhalten?

Ein Schwerpunkt der ersten Studie lag auf der Analyse von Blickbewegungen der Lernenden, um Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse während des Lernens auszumachen. Die Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse zeigen, dass die Lernenden mit Zeicheninstruktion den Text bzw. einzelne Textpassagen ausführlicher lasen (*rereadings*), sich anteilig länger und intensiver mit den zentralen Stellen des Textes beim Lesen beschäftigten (*focused fixation time*), mehr Blickwechsel pro Minute zwischen den Abbildungen und den Textabschnitten ausführten (*transition rate*) und dabei auch einen höheren Anteil an sinnvollen Blickwechseln aufwiesen (*meaningful transitions*: von den Zeichnungen ausgehend wurden als nächstes die zentralen Textstellen fixiert) als Lernende, die zum Text vorgegebene Abbildungen erhielten. Im Hinblick auf die im CMDC (van Meter & Firetto, 2013) angenommenen kognitiven Verarbeitungsprozesse des Selektierens und Integrierens zeigen die Ergebnisse, dass Lernende sich bei der Erstellung sinnstiftender Zeichnungen intensiv mit dem Text auseinandersetzen, dabei ihre Aufmerksamkeit verstärkt auf die zentralen Textstellen richten und im Zuge der Integration der depiktiven und deskriptiven Informationen

bei den Blickwechseln zurück in den Text in höherem Maße gezielt die zentralen Textstellen ansteuern. Der höhere Anteil an Fixationszeit auf den zentralen Stellen des Texts beim Lesen sowie der höhere Anteil an sinnstiftenden Blickwechseln zwischen den Abbildungen und dem Text der Lernenden mit Zeicheninstruktion weisen dabei auf einen höheren Erfolg bei der Selektion relevanter Informationen und der Integration dieser mit der Abbildung hin. Diese Unterschiede im Blickverhalten als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden mit Zeicheninstruktion gegenüber Lernenden mit einer Text-Bild-Kombination stellen die primären neuen Erkenntnisse dieser Studie dar.

4.1.2 Zentrale Ergebnisse der zweiten Studie

1. Inwiefern entsprechen die Lernleistungen der Lernenden mit Zeicheninstruktion aus Studie II den Lernleistungen der Lernenden mit Zeicheninstruktion aus Studie I?

Da sowohl in der ersten als auch in der zweiten Studie Lernende der gleichen Altersstufe sinnstiftende Zeichnungen zum gleichen Sachtext erstellten, wurden äquivalente Lernleistungen erwartet. Die Ergebnisse zeigen, dass Lernende mit Zeicheninstruktion in beiden Studien sich weder in der Qualität der erstellten Zeichnungen während des Lernens noch in den drei Lernerfolgsmaßen unterschieden und somit in Bezug auf die Lernleistungen äquivalente Ergebnisse erzielten.

2. Inwiefern unterscheiden sich Lernende, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von Lernenden, welche Zusammenfassungen zu einem Text erstellen, im Hinblick auf den Lernerfolg?

Ausgehend von den Ergebnissen von Leopold und Leutner (2012) wurde erwartet, dass Lernende mit Zeicheninstruktion Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion in den drei Lernerfolgsmaßen übertreffen. Tatsächlich unterschieden sich die Lernenden in ihren Leistungen im Behaltens- und Transfertest nicht voneinander. Einzig im Zeichentest erzielten Lernende mit Zeicheninstruktion wie erwartet bessere Ergebnisse als Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion. Da sowohl Lernende mit Zeicheninstruktion als auch Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion gleichwertige Lernleistungen erzielten, haben sich beide Lernstrategien als gleichwertig hilfreich erwiesen, ein Textverständnis herzustellen.

3. Inwiefern prognostiziert die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen den Lernerfolg der Lernenden, welche die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden?

Im Hinblick auf das *prognostic drawing principle* (Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn, Mayer et al., 2010) wurde auch in der zweiten Studie erwartet, dass die Qualität der während des Lernens erstellten Zeichnungen prädiktiv für den Lernerfolg ist. Die Ergebnisse der zweiten Studie zeigen, dass nur ein statistisch bedeutsamer positiver Zusammenhang zwischen der Qualität der während des Lernens erstellten Zeichnungen und dem Behaltens- und dem Zeichentest besteht. In dieser Studie gab es keinen Zusammenhang zwischen der Qualität der Zeichnung und dem eingesetzten Transferwissenstest. Dementsprechend ist in dieser Studie die Qualität der Zeichnungen nur ein Prädiktor für das erworbene Textverständnis, nicht aber für das Transferwissen.

4. Inwiefern lassen sich die Blickbewegungsmuster der Lernenden mit Zeicheninstruktion aus Studie I in Studie II replizieren?

Ein Hauptanliegen der zweiten Studie lag in der Replikation der in der ersten Studie gefundenen Blickbewegungsmuster der Lernenden mit Zeicheninstruktion, um in einem zweiten Schritt zu untersuchen, ob sich die für das sinnstiftende Zeichnen gefundenen Blickbewegungsmuster von den Blickbewegungsmustern einer anderen Lernstrategie abgrenzen lassen. Lernende mit Zeicheninstruktion der zweiten Studie lasen den Text bzw. einzelne Textpassagen genauso ausführlich (*rereadings*) wie die Lernenden mit Zeicheninstruktion der ersten Studie. Weiterhin unterschieden sie sich nicht im Hinblick auf die anteilig auf die zentralen Textstellen gerichtete Aufmerksamkeit beim Lesen (*focused fixation time*) sowie der ausgeführten Blickwechsel pro Minute zwischen den Zeichnungen und den Textabschnitten (*transition rate*). In der zweiten Studie hatten Lernende mit Zeicheninstruktion allerdings einen höheren Anteil sinnvoller Blickwechsel (*meaningful transitions*) als Lernende mit Zeicheninstruktion der ersten Studie. Zusammengefasst entsprechen die für die Lernenden mit Zeicheninstruktion in der ersten Studie gefundenen Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse nahezu vollständig denen der Lernenden mit Zeicheninstruktion der zweiten Studie, was auf eine Replikation der Befunde hindeutet.

5. Inwiefern unterscheiden sich die Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, von denen der Lernenden, die Zusammenfassungen zu einem Text erstellen?

Das Hauptaugenmerk der zweiten Studie galt der Frage, ob sich die für das sinnstiftende Zeichnen gefundenen Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse von den Blickbewegungsmustern, welche bei der Lernstrategie des Zusammenfassens auftreten, abgrenzen lassen. Es wurde erwartet, dass gemäß Larkin und Simon (1987) die textbasierte Verarbeitung bei der Anwendung der Lernstrategie des Zusammenfassens eher linear verläuft, wohingegen van Meter und Firetto (2013) für das sinnstiftende Zeichnen annehmen, dass die Textverarbeitung rekursiv erfolgt (siehe Kapitel 1.2.2). Dementsprechend wurde erwartet, dass Lernende, welche die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwenden, ihre Aufmerksamkeit mehr auf die zentralen Textstellen richten und einen höheren Anteil sinnstiftender Integrationsprozesse aufweisen als Lernende, welche die Strategie des Zusammenfassens anwenden. Die Blickbewegungsanalyse der zweiten Studie bestätigt diese Annahmen: Obwohl sowohl der Einsatz der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens als auch der Einsatz der Lernstrategie des Zusammenfassens zu gleichwertigen Leistungen im Hinblick auf Textverständnis führte und die Lernenden sich auch nicht im Hinblick auf ihre Transferleistung unterschieden, erreichten die Lernenden das Lernziel über eine unterschiedliche kognitive Verarbeitung der dargebotenen Informationen. Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion beschäftigten sich ausführlich mit dem Text, indem sie ihn bzw. einzelne Textpassagen häufiger lasen (*rereadings*) und mehr Blickwechsel pro Minute zwischen der Arbeitsfläche und dem Text durchführten (*transition rate*) als Lernende mit Zeichneninstruktion. Letztere arbeiteten hingegen zielgerichteter mit dem Text, indem sie weniger im gesamten Text lasen (*rereadings*), sich dafür aber anteilig länger und intensiver mit den zentralen Textstellen beim Lesen beschäftigten und einen höheren Anteil sinnvoller Blickwechsel (*meaningful transitions*) aufwiesen als Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion. Zusammengefasst weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens zu einer strategisch fokussierteren Nutzung der kognitiven Prozesse des Selektierens und Integrierens führt. Damit stehen die gefundenen Blickbewegungsmuster im Einklang mit den Annahmen des CMDC und lassen sich zudem von den Blickbewegungsmustern des Zusammenfassens abgrenzen.

4.1.3 Zentrale Ergebnisse der dritten Studie

1. Inwiefern unterscheiden sich Lernende mit hohem und geringem Vorwissen bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens in der Qualität der angefertigten Zeichnungen und im Lernerfolg?

Von Lernenden mit hohem Vorwissen wird angenommen, dass sie über mehr domänenspezifisches Wissen und kognitive Schemata verfügen als Lernende mit geringem Vorwissen, sodass sie dementsprechend deutlich abstraktere mentale Modelle entwickeln (z. B. Braune & Foshay, 1983; Cook, Carter & Wiebe, 2008; Snyder, 2000). Da auch im CMDC angenommen wird, dass das Vorwissen einen großen Einfluss auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse und damit auf die Konstruktion des mentalen Modells hat, wurde in der dritten Studie erwartet, dass bei der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens Lernende mit hohem Vorwissen qualitativ hochwertigere Zeichnungen während des Lernens erstellen und besser in den drei eingesetzten Lernerfolgsmaßen abschneiden als Lernende mit geringem Vorwissen. Insgesamt erstellten Lernende mit hohem Vorwissen qualitativ hochwertigere Zeichnungen als Lernende mit geringem Vorwissen. Weiterhin erwarben Lernende mit hohem Vorwissen ein höheres Textverständnis (gemessen am Behaltens- und Zeichentest) und konnten dieses Wissen besser im Transferwissenstest anwenden als Lernende mit geringem Vorwissen. Lernende mit geringem Vorwissen konnten ihren Wissensrückstand gegenüber den Lernenden mit hohem Vorwissen durch die Lernsitzung und die Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens jedoch beträchtlich verringern.

2. Inwiefern prognostiziert die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen den Lernerfolg der Lernenden?

Auch in der dritten Studie wurde erwartet, dass die Qualität der während des Lernens angefertigten Zeichnungen prädiktiv für den Lernerfolg ist. Die Ergebnisse der dritten Studie zeigen, dass ein statistisch bedeutsamer positiver Zusammenhang zwischen der Qualität der während des Lernens erstellten Zeichnungen und den anschließenden Lernerfolgstests besteht: Lernende, welche qualitativ hochwertige Zeichnungen erstellten, wiesen auch unabhängig von der Höhe ihres Vorwissens in allen drei Lernerfolgsmaßen höhere Ergebnisse auf. Somit liefert die dritte Studie einen weiteren empirischen Beleg für die Gültigkeit des *prognostic drawing principles* (Leutner & Schmeck, 2014; Schwaborn, Mayer et al., 2010).

3. Inwiefern unterscheiden sich die Blickbewegungsmuster als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse der Lernenden mit hohem Vorwissen von denen der Lernenden mit geringem Vorwissen während der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens?

Um herauszufinden, wie sich das Vorwissen auf die kognitive Verarbeitung während des sinnstiftenden Zeichnens auswirkt, wurden die Blickbewegungen der Lernenden mit hohem und geringem Vorwissen ausgewertet. Es wurde erwartet, dass Lernende mit hohem Vorwissen ihre Aufmerksamkeit stärker auf die zentralen Textstellen richten und mehr sinnstiftende Integrationsversuche zwischen diesen Textstellen und der Zeichnung unternehmen als Lernende mit geringem Vorwissen. Lernende mit geringem Vorwissen lasen den Text bzw. Textpassagen häufiger als Lernende mit hohem Vorwissen (*rereadings*), was auf ein ausführlicheres Lesen hindeutet. Die Lernenden mit hohem Vorwissen beschäftigten sich hingegen anteilig länger und intensiver mit den zentralen Stellen des Textes beim Lesen (*focused fixation time*), was auf eine bessere Selektionsfähigkeit hinweist. Es war weder ein Unterschied im Hinblick auf die ausgeführten Blickwechsel pro Minute von der Zeichnung zurück in den Text (*transisiton rate*) noch auf den Anteil der sinnvollen Blickwechsel (*meaningful transitions*) festzustellen. Sowohl Lernende mit hohem als auch geringem Vorwissen unternahmen gleichermaßen Versuche, die deskriptiven und depiktiven Informationen in sinnstiftender Weise zu verknüpfen.

4.2 Empirische und theoretische Implikationen

Die zentralen Ergebnisse der hier präsentierten Studien tragen dazu bei, die in den theoretischen Modellen angenommenen zugrundeliegenden Prozesse des sinnstiftenden Zeichnens empirisch zu festigen (siehe Kapitel 1.2). Die vorliegenden drei Studien ermöglichen es daher ein besseres Verständnis darüber zu erhalten, in welcher Weise die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens Lernenden dabei hilft, Informationen aus einem komplexen Sachtext zu entnehmen. Im CMDC wird ein dreiphasiger Selbstregulationskreislauf angenommen, in dessen erster Phase Lernende sich Standards für die zu erstellende Zeichnung setzen. Diese Standards beinhalten, welche Details die Zeichnung enthalten muss und wie die im Text beschriebenen Zusammenhänge zeichnerisch dargestellt werden können. Durch dieses Setzen von Standards, so nehmen van Meter und Firetto (2013) an, wird während des Lernens die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die zentralen Elemente des Textes und deren (räumliche) Zusammenhänge gelenkt.

Mithilfe der Analyse von Blickbewegungen konnten in allen drei Studien Belege für diese Annahme gefunden werden. Im Vergleich zu Lernenden, die mit einem Text und vorgegebenen Abbildungen lernten, richteten Lernende, welche sinnstiftende Zeichnungen erstellten, ihre Aufmerksamkeit beim Lesen verstärkt auf die zentralen Textstellen (siehe Kapitel 2, Studie I). Auch im Vergleich zu einer anderen generativen Lernstrategie, der Lernstrategie des Zusammenfassens, konnte die anteilige Aufmerksamkeitskonzentration auf die zentralen Stellen des Textes anhand der Blickbewegungsmuster nachgewiesen werden (siehe Kapitel 2, Studie II). Die Blickbewegungsanalyse der dritten Studie weist schließlich darauf hin, dass erwartungsgemäß Lernende mit hohem Vorwissen besser in der Lage sind, zwischen wichtigen und weniger wichtigen Informationen im Text zu unterscheiden und sich dementsprechend beim Lesen auf relevante Inhalte konzentrieren, was auf ausgeprägtere Selektionsprozesse hindeutet (siehe Kapitel 3, Studie III).

Der Zeichenprozess wird im CMDC als ein Durchlaufen mehrerer Rekursionen beschrieben, bei welchen Lernende immer wieder Informationen auswählen, diese organisieren und untereinander und mit ihrem Vorwissen integrieren. Neben den deskriptiven Informationen des Textes nimmt auch die sich in der Entstehung befindende Zeichnung dabei Einfluss auf das mentale Modell, welches sich während des Lernprozesses entsprechend der Rekursionsannahme in einer stetigen Revision befindet. In Übereinstimmung mit Schnotz' (2014) ITPC werden die Bildinformationen der Zeichnung auf dem Papier in das mentale Vorstellungsbild aufgenommen und von dort an das mentale Modell weitergegeben (siehe Abbildung 5). Gleichzeitig erhält das mentale Modell Informationen aus der propositionalen Repräsentation, welche vornehmlich von den aus dem Text selektierten Informationen gespeist wird. Dementsprechend stellen Lernende im Zuge des Verstehensprozesses aktiv Verknüpfungen zwischen ihren depiktiven Zeichnungen und den deskriptiven Beschreibungen im Text her. In allen drei Studien konnte gezeigt werden, dass Lernende bei der Erstellung einer Zeichnung verstärkt Verknüpfungspunkte zwischen ihrer Zeichnung und dem Text suchten und dass dabei der Anteil an sinnstiftenden Integrationsprozessen höher war als vergleichsweise beim Lernen mit einem Text und einem vorgegebenen Bild oder bei der Ausführung der Lernstrategie des Zusammenfassens.

Der höhere Anteil an sinnstiftenden Integrationsprozessen und der höhere Anteil an Fixationszeit auf den zentralen Stellen des Textes der Lernenden mit Zeicheninstruktion deuten außerdem darauf hin, dass insbesondere im Vergleich zu einer klassischen multimedialen Lernumgebung, in welcher neben dem Text auch entsprechende Abbildungen vorgegeben sind, Lernende beim sinnstiftenden Zeichnen verstärkt dazu angeregt werden, sich intensiv

mit dem Aufbau der Abbildungen sowie mit deren Details und ihrer Zusammenhänge auseinanderzusetzen und diese entsprechend in einen Sinnzusammenhang mit den im Text zur Verfügung gestellten Informationen zu bringen. Die Bilddetails, welche zwar im Text beschrieben sind, aber von den Lernenden selbstständig in die Zeichnung integriert werden müssen, können bei vorgegebenen Abbildungen leicht übersehen werden – insbesondere dann, wenn Lernende nur über ein geringes Vorwissen verfügen (z. B. Cheng & Gilbert, 2014; Chittleborough & Treagust, 2008; Cook et al., 2008; Hannus & Hyönä, 1999; Kragten, Admiraal & Rijlaarsdam, 2013, 2015; Seufert, 2003). Dieses Übersehen würde dann zu der Konstruktion eines eher oberflächlichen mentalen Modells führen, was sich wiederum auf die Lernleistung auswirkt.

Beim sinnstiftenden Zeichnen übersetzen Lernende ihr mentales Modell in ein Vorstellungsbild, welches dann als Zeichnung externalisiert werden muss. Dementsprechend kann die Qualität der Zeichnung Aufschluss darüber geben, wie ausgeprägt das mentale Modell der Lernenden im Hinblick auf das Textverständnis ist. In diesem Zusammenhang erweist sich die Qualität der Zeichnungen in allen drei Studien als prädiktiv für die in den Lernerfolgstests erbrachte Leistung (*prognostic drawing principle*). Im Hinblick auf das erworbene Textverständnis legen die Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse und der Lernerfolgstests der ersten Studie nahe, dass sinnstiftendes Zeichnen zu einem komplexeren mentalen Modell führt als vergleichsweise das Lernen mit einem Text und vorgegebenen Abbildungen.

In diesem Zusammenhang zeigen die Ergebnisse der dritten Studie, dass das Vorwissen einen entscheidenden Einfluss auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse während des sinnstiftenden Zeichnens hat. Wer die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anwendet und bereits ein hohes Vorwissen besitzt, kann einen Sachtext strategisch fokussierter bearbeiten als Strategieranwender mit geringem Vorwissen. Weiterhin entwickeln Lernende mit hohem Vorwissen bei der Strategieranwendung komplexere mentale Modelle als Lernende mit geringem Vorwissen, was sich in der Qualität der während des Lernens erstellten Zeichnungen und in den Lernerfolgsmaßen widerspiegelt (siehe Kapitel 3).

Vor dem Hintergrund des angenommenen Selbstregulationskreislaufs erläutern van Meter und Firetto (2013) im CMDC: „Metacognitive control is responsible for guiding and affecting the operations a learner carries out“ (S. 260). Der momentane Stand der Zeichnung gibt den Lernenden Auskunft über das bisher erworbene Textverständnis. Der Zeichenprozess wird unterbrochen, sofern Elemente in der Zeichnung nicht zusammenpassen bzw. sich Elemente nicht externalisieren lassen (Reason, 1990; van Meter & Firetto, 2013). Somit sind

Lernende gezwungen, ihr mentales Modell zu überarbeiten, indem sie die zur Verfügung stehenden depiktiven Informationen der Zeichnung mit den deskriptiven Informationen des Textes abgleichen, sodass gegebenenfalls die Prozesse des Selektierens, Organisierens und Integrierens in einer erneuten Rekursion angestoßen werden. Die Ergebnisse der hier präsentierten Studien stehen im Einklang mit dieser Annahme. Lernende mit Zeicheninstruktion wechselten in allen Studien mehrfach von der Zeichenfläche zurück in den Text und lasen den Text bzw. einzelne Textpassagen erneut, um abermals Informationen auszuwählen und diese mit der Zeichnung zu integrieren. Der höhere Anteil an Fixationszeit auf den zentralen Textstellen sowie der höhere Anteil an sinnvollen Blickwechseln zwischen der Zeichnung zu den zentralen Stellen des Textes, welche Lernende mit Zeicheninstruktion gegenüber Lernenden mit einer Text-Bild-Kombination (Studie I) oder Lernenden mit Zusammenfassungsinstruktion (Studie II) aufwiesen, weisen dabei darauf hin, dass im Zuge der Überarbeitungsphasen des mentalen Modells die entsprechenden relevanten Informationen erfolgreicher selektiert und integriert worden sind.

Da in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen angenommen wird, dass das Vorwissen einen großen Einfluss auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse nimmt, überraschte der Befund der dritten Studie, dass sich der Anteil an sinnvollen Blickwechseln der Lernenden mit hohem Vorwissen nicht von dem der Lernenden mit geringem Vorwissen unterschied. Dieser Befund kann einerseits darauf zurückzuführen sein, dass Lernende mit hohem Vorwissen möglicherweise dazu in der Lage waren, die für die Zeichnung relevanten Textinformationen lange genug im Arbeitsgedächtnis zu behalten, um den Zeichenprozess auszuführen. Weiterhin könnte das mentale Modell der Lernenden mit hohem Vorwissen derart ausgeprägt gewesen sein, dass eine Überarbeitung nicht notwendig war und die Lernenden entsprechend weniger die Bildinformationen mit dem Text abgleichen mussten. Andererseits erreichten auch die Lernenden mit geringem Vorwissen sehr gute Ergebnisse in den Lernerfolgstests und erstellten weiterhin auch qualitativ hochwertige Zeichnungen. Dies könnte ein Indikator dafür sein, dass der Text selbst nicht so komplex ist, dass er sehr aufwendige Organisations- und Integrationsaktivitäten seitens der Studierenden erforderte und die Studierenden die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens unabhängig von ihrem Vorwissen gut anwenden konnten.

Hinsichtlich der Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens konnte in der ersten Studie gezeigt werden, dass Lernende ein höheres Textverständnis erwerben, wenn sie sinnstiftende Zeichnungen zu einem Text selbst herstellen anstatt vorgegebene Abbildungen zu erhalten. Damit liefern die Ergebnisse einen weiteren empirischen Beleg für das

generative drawing principle, welches besagt: „People learn better from a science text when they are asked to draw illustrations representing the main ideas of the text“ (Schwamborn, Mayer et al., 2010, S. 878; siehe auch Leutner & Schmeck, 2014). Entgegen den Ergebnissen von Leopold und Leutner (2012) konnte jedoch in der zweiten Studie kein Unterschied hinsichtlich des Textverständnisses zwischen Lernenden mit Zeicheninstruktion und Lernenden mit Zusammenfassungsinstruktion festgestellt werden. Im Gegensatz zu den von Leopold und Leutner (2012) durchgeführten Studien erhielten in der vorliegenden zweiten Studie sowohl Lernende mit Zeicheninstruktion als auch Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion instruktionale Hilfen in Form einer Legende, welche die relevanten Elemente des Textes enthielt. Zwar schenken Lernende mit Zeicheninstruktion den instruktionalen Hilfen mehr Aufmerksamkeit als Lernende mit Zusammenfassungsinstruktion, jedoch scheint eine derartige Unterstützung das Erstellen der Zusammenfassungen sinnvoll angeleitet zu haben (Fiorella & Mayer, 2015). Weiterhin könnte die Vertrautheit der Lernenden mit den eingesetzten Lernstrategien Einfluss auf das Ergebnis gehabt haben. Vor der Lernsitzung erhielten die Lernenden einen Fragebogen, in welchem sie die entsprechenden Lernstrategien ankreuzen sollten, die sie normalerweise beim Lernen mit einem Text verwenden (adaptiert von Wagner, Helmke & Rösner, 2009). Die Lernstrategie, Zeichnungen zu einem Text zu erstellen, wird dabei nur von 29 % der Schülerinnen und Schüler eingesetzt, während bei der Lernstrategie des Zusammenfassens 62 % der Lernenden angaben, diese regelmäßig zu nutzen. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da insbesondere Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I schon früh an die sogenannte 5-Schritt-Lesemethode¹⁷ zur Erfassung eines Textes herangeführt werden und diese Methode sich in der Methodenübersicht vieler Schulbücher finden lässt (z. B. im Deutschbuch von Schurf & Wagener, 2015, oder im Biologiebuch von Eck, Hegemann, Marx & Spieß, 2016).

In allen drei hier vorliegenden Studien wurde die Qualität der erstellten Zeichnungen während des Lernens näher untersucht. In Übereinstimmung mit dem *prognostic drawing principle* (Leutner & Schmeck, 2014; Schwamborn, Mayer et al., 2010) und mit bisherigen Befunden (z. B. Mason, Lowe & Tornatora, 2013; Schmeck et al., 2014; Schmidgall, 2017; van Meter, 2001) konnte gezeigt werden, dass Lernende insbesondere dann im Hinblick auf ihr Textverständnis vom Einsatz der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren, wenn sie in der Lage sind, qualitativ hochwertige Zeichnungen zu erstellen.

¹⁷ (1) Überblick verschaffen; (2) Fragen stellen, auf die der Text eine Antwort geben kann; (3) Genaues Lesen; (4) Text in Abschnitte gliedern und zusammenfassen; (5) Hauptaussagen formulieren (Klippert, 1999).

4.3 Praktische Implikationen

Multimediales Lernmaterial kann dann sein volles Potenzial entfalten, wenn die beigelegten Abbildungen den Text in sinnstiftender Weise ergänzen. Mayer (2009, 2014b) hat daher Gestaltungsprinzipien für multimediale Lernmaterialien formuliert, die für eine optimale kognitive Auslastung beim Lernen sorgen sollen. Schulbuchanalysen zeigen, dass trotz dieser empirisch fundierten Gestaltungsprinzipien viele Abbildungen untauglich dafür sind, Lernende beim Erschließen eines Textes zu unterstützen (z. B. Brandstetter-Korinth, 2017; Heinze & Matthes, 2010). Daher bietet es sich an, Lernende selbst geeignete Abbildungen zu einem Sachtext im Unterricht erstellen zu lassen. Sinnstiftende Zeichnungen zu einem Text zu erstellen kann sich dabei jedoch nicht nur positiv auf den Lernerfolg auswirken (z. B. Fiorella & Mayer, 2015; Kapitel 2 und 3), sondern kann auch das Interesse und die Motivation am Sachverhalt fördern (z. B. Costantino, 1986; Fisher, 1976; Johnson, 1988; McConnell, 1993; Moore & Caldwell, 1993), das kognitive Engagement der Lernenden stimulieren (z. B. Chi, 2009; Chi & Wylie, 2014) sowie Selektionsprozesse anregen und die sinnstiftende Integration von verbalen und piktoralen Informationen unterstützen (siehe Kapitel 2 und 3). Jedoch unterliegt auch das sinnstiftende Zeichnen Rahmenbedingungen, die es für eine erfolgreiche Anwendung im Schulkontext zu beachten gilt. Um von der Lernstrategie zu profitieren, sollten Lernende in der Lage sein, qualitativ hochwertige Zeichnungen zu erstellen, ohne sich bei diesem Visualisierungsprozess kognitiv zu überlasten. Geeignete instruktionale Hilfen, wie die eingesetzte Werkzeugleiste und der teilweise vorgegebene Zeichenhintergrund (Schmeck et al., 2014; Schwamborn, Mayer et al., 2010), haben sich auch in der vorliegenden Arbeit bewährt. Weiterhin konnte in Übereinstimmung mit früheren Befunden gezeigt werden, dass die Qualität der selbst erstellten Zeichnungen zu einem Sachtext einen geeigneten Prädiktor für das erworbene Textverständnis darstellt (*prognostic drawing principle*).

Darüber hinaus zeigt diese Arbeit, dass insbesondere Lernende mit geringem Vorwissen von der Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren können, um einen Wissensrückstand im Vergleich zu Lernenden mit bereits hohem vorhandenen Vorwissen auszugleichen. Damit würde sich im schulischen Kontext die Lernstrategie besonders dann anbieten, wenn Klassen leistungsheterogen zusammengesetzt sind.

4.4 Limitationen und Ausblick

Das übergreifende Ziel der in dieser Arbeit präsentierten Studien war es, die in den theoretischen Modellen zum sinnstiftenden Zeichnen (d. h. der GTDC und dem CMDC; siehe Kapitel 1.2) angenommenen Annahmen zur kognitiven Verarbeitung mithilfe von Blickbewegungsanalysen empirisch zu überprüfen. Das Aufzeichnen von Blickbewegungen hat sich dabei als eine geeignete Methode herausgestellt, um Einsicht in den Aufmerksamkeitsfokus Lernender bei der Bearbeitung eines Sachtextes zu erhalten, sodass anhand der gewonnenen Blickbewegungsmuster Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse ausgemacht werden konnten. Die gewonnenen Daten zu Indikatoren für kognitive und perzeptuelle Prozesse sind daher eine geeignete Ergänzung zu den über klassische Posttests erfassten Lernerfolgsmessungen, sodass ein detaillierter Einblick in das Lernverhalten Lernender bei der Bearbeitung eines Sachtextes gewährt wird.

Obwohl gemäß der Eye-Mind-Hypothese (Just & Carpenter, 1976, 1980) davon auszugehen ist, dass eine direkte Beziehung zwischen Fixationen und kognitiver Informationsverarbeitung besteht (z. B. Hannus & Hyönä, 1999; Hegarty & Just, 1993; Underwood, Humphrey & Foulsham, 2008), eine Sakkade eine Verschiebung der Aufmerksamkeit anzeigt (z. B. Deubel & Schneider, 1996; Hoffman & Subramaniam, 1995; Rayner, McConkie & Ehrlich, 1978) und Blickwechsel mit Integrationsprozessen assoziiert sind (z. B. Kragten et al., 2015; Mason, Pluchino, Tornatora & Ariasi, 2013; Schwonke, Berthold & Renkl, 2009), ist es aufgrund der notwendigen Interpretation der Blickbewegungsdaten unmöglich mit absoluter Sicherheit zu sagen, ob tatsächlich eine adäquate kognitive Verarbeitung erfolgreich stattgefunden hat. Dementsprechend sollten zukünftige Forschungsprojekte zum sinnstiftenden Zeichnen bei der Erfassung von Blickbewegungen stärker auf methodische Triangulation zur Vermeidung von Fehlinterpretationen setzen und neben Lernerfolgsmessungen auch weitere Maße wie z. B. retrospektives lautes Denken in die Datenerhebung mit aufnehmen (Jarodzka, Scheiter, Gerjets & van Gog, 2010; Koning, Tabbers, Rikers & Paas, 2010; van Gog, Paas, van Merriënboer & Witte, 2005; van Gog & Jarodzka, 2013). Die Eye-Tracking-Brille zeichnet während der Lernsituation ein Video aus der Ich-Perspektive auf, in welches die Blickbewegungen des Lernenden eingeblendet werden. Diese Aufzeichnung kann im Anschluss an die Lernsituation von der jeweiligen Versuchsperson angeschaut und im Hinblick auf kognitive und metakognitive Verarbeitungsprozesse hin kommentiert werden.

In diesem Zusammenhang bietet sich auch eine qualitative Analyse der Eye-Tracking-Videos an, um z. B. planvolle von planlosen Blickbewegungsmustern zu unterscheiden. Hierzu

könnten zukünftige Forschungsprojekte geeignete Kodiermanuale entwerfen, sodass Prozesse der Selbstüberwachung und Selbstregulation genauer bestimmt und von Blickbewegungen abgegrenzt werden können, die z. B. aufgrund von Desorientierung entstanden sind.

Die in dieser Arbeit präsentierten Studien liefern weitere Belege für die Lernförderlichkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens. Lernende, welche die Strategie des sinnstiftenden Zeichnens anwendeten, erwarben ein höheres Textverständnis als Lernende, die mit einem Text und vorgegebenen Abbildungen lernten (Kapitel 2, Studie I). Im Vergleich zu einer anderen generativen Lernstrategie, der Strategie des Zusammenfassens, konnte jedoch kein Unterschied im erworbenen Textverständnis festgestellt werden – die Anwendung beider Lernstrategien führte zu einem gleichwertigen Lernerfolg hinsichtlich des Textverständnisses (Kapitel 2, Studie II). Weiterhin unterschieden sich in beiden Studien die Lerngruppen nicht im Transferwissenstest voneinander. Letzteres kann darauf zurückzuführen sein, dass die Vorteile des sinnstiftenden Zeichnens hinsichtlich der Lernwirksamkeit eher auf die vorliegenden Lerninhalte beschränkt zu sein scheinen, für welche konkret Zeichnungen zu erstellen waren, und nicht zwangsläufig für Transferleistungen gelten (van Meter & Firetto, 2013; Waters, van Meter, Perrotti, Drogo & Cyr, 2005, 2011). Van Meter und Firetto (2013) weisen darauf hin, dass die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens nicht alle Lernprobleme lösen kann und – ebenso wie andere Lernstrategien – dann am effektivsten wirkt, wenn sie auf die Lernziele abgestimmt ist. Weiterhin empfehlen sie, dass die Schlussfolgerungen der *structure mapping hypothesis*¹⁸ (Schnotz & Bannert, 2003; siehe auch Kapitel 1.2.2) auch auf die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens anzuwenden seien. Andererseits konnten andere Studien zum sinnstiftenden Zeichnen Effekte im Transferwissen nachweisen (z. B. Gobert & Clement, 1999; Hall, Bailey & Tillman, 1997; Leopold & Leutner, 2012; Schwamborn, Thillmann, Leopold, Sumfleth & Leutner, 2010; Schwamborn, Mayer et al., 2010; van Meter, Aleksic, Schwartz & Garner, 2006; für eine Übersicht siehe Fiorella & Mayer, 2015). Zukünftige Forschungsprojekte sollten daher einen Schwerpunkt auf die Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens im Vergleich zu anderen generativen Lernstrategien legen und die Wissensdomänen ausmachen, für die sich die jeweiligen Lernstrategien besonders eignen. Dabei sollte auch berücksichtigt werden, ob Lernende über einen längeren Zeitraum hinweg in der Lage sind, ihr Wissen abzurufen. Weiterhin ist eine

¹⁸ *Structure mapping hypothesis* (Schnotz & Bannert, 2003): Wenn sich externe Repräsentationen strukturell unterscheiden, wirken sich diese Unterschiede auch auf das mentale Modell aus. Im Kontext der CMDC bedeutet das, dass wissensbasierte Leistungen in einem Lernerfolgstest an die spezifischen Merkmale des konstruierten mentalen Modells gebunden sind und verbesserte Leistung nur dann erwartet werden kann, wenn die eingesetzten Lernerfolgstests gut auf die Merkmale der spezifischen Wissensrepräsentation abgestimmt sind (van Meter & Firetto, 2013).

detailliertere Untersuchung der Wirkung des sinnstiftenden Zeichnens auf das Transferwissen notwendig. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die eingesetzten Tests gut auf die Merkmale der spezifischen Wissensrepräsentation abgestimmt sind.

In Übereinstimmung mit dem CMDC (van Meter & Firetto, 2013) zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass das Vorwissen die kognitiven Verarbeitungsprozesse während des sinnstiftenden Zeichnens stark beeinflusst und damit auch Einfluss auf die Konstruktion des mentalen Modells hat (siehe Kapitel 3). Allerdings konnten Lernende mit geringem Vorwissen ihren Wissensrückstand gegenüber Lernenden mit hohem Vorwissen durch die Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens beträchtlich verringern. Daher sollten zukünftige Forschungsprojekte untersuchen, inwiefern Lernende mit geringem domänenspezifischen Wissen noch stärker von der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens profitieren können und inwiefern die Blickbewegungsmuster der Lernenden, welche über mehr domänenspezifisches Wissen und kognitive Schemata verfügen, dabei helfen können. Gerade unter dem Aspekt, dass insbesondere Schülerinnen und Schüler an nicht gymnasialen Schularten größere Schwierigkeiten mit der Erschließung komplexer Texte haben als Schülerinnen und Schüler an Gymnasien (Weis, Zehner, Sälzer, Strohmaier & Pfof, 2016), könnte die Vermittlung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens besonders im Kontext naturwissenschaftlicher Bildung hilfreich zur Erschließung von Sachtexten sein. Dementsprechend sollten zukünftige Studien nicht nur den Einsatz der Strategie an Gymnasien, sondern auch an nicht gymnasialen Schularten untersuchen und die Ergebnisse gegenüberstellen. Die aufgezeichneten Blickbewegungsmuster von Lernenden mit hohem domänenspezifischem Wissen und ausgeprägten kognitiven Schemata könnten dabei ebenfalls hilfreich sein, die Strategieanwendung zu verbessern. Beispielsweise werden im medizinischen Bereich *eye movement modeling examples* (EMME) erfolgreich dazu eingesetzt, die adaptive Expertise in der medizinischen Bilddiagnose zu fördern (Gegenfurtner, Lehtinen, Jarodzka & Säljö, 2017). In Bezug auf das sinnstiftende Zeichnen gibt es bisher jedoch noch keine Studien, welche die Wirksamkeit von EMMEs zur Vermittlung von Zeichenstrategien eingesetzt haben.

Von der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens wird weiterhin angenommen, dass sie dann ihr volles Potenzial entfalten kann, wenn Lernende qualitativ hochwertige Zeichnungen erstellen können, ohne sich dabei kognitiv zu überlasten. Daher wurde in den vorliegenden Studien auf instruktionale Hilfen gesetzt, um die durch den Zeichenprozess induzierte kognitive Belastung zu verringern. Die kognitive Belastung wurde in den vorliegenden Studien mithilfe der von Paas (1992) entwickelten subjektiven Ein-Item-Bewertungsskala zur

Erfassung der investierten mentalen Anstrengung gemessen, jedoch konnte in den hier vorliegenden Studien auf Grundlage dieser Skala kein Unterschied in der mentalen Anstrengung der untersuchten Gruppen festgestellt werden. Allerdings ist die Messung der kognitiven Belastung mit einem einzelnen Item grundsätzlich problematisch, da auf diese Weise nicht zwischen den verschiedenen Arten der kognitiven Belastung unterschieden werden kann¹⁹. Weiterhin weisen neueste Arbeiten in diesem Forschungsgebiet darauf hin, dass die von Paas (1992) entwickelte Skala zur Bewertung der investierten mentalen Anstrengung vornehmlich nur die inhaltsbedingte kognitive Belastung (*intrinsic cognitive load*) misst (z. B. Leppink, Paas, van der Vleuten, van Gog & van Merriënboer, 2013; Naismith, Cheung, Ringsted & Cavalcanti, 2015; Young, van Merriënboer, Durning & Cate, 2014). Die Erfassung von Blickbewegungsdaten eröffnet der Cognitive Load Forschung diesbezüglich neue Wege, um die kognitive Belastung Lernender zu messen und zwischen den verschiedenen Belastungsformen zu diskriminieren. In einigen Studien wurde z. B. die Pupillometrie als Maß zur Bestimmung der kognitiven Belastung verwendet (z. B. Bartels & Marshall, 2012; Köhl, Stebner, Navratil, Fehrer & Münzer, 2017; Marshall, 2007). Weiterhin können jedoch auch Fixationen, Sakkaden oder auch Lidschläge als Indikatoren für die kognitive Belastung herangezogen werden (eine Übersicht bieten Zagermann, Pfeil & Reiterer, 2016). Vor diesem Hintergrund sollten zukünftige Forschungsprojekte zum sinnstiftenden Zeichnen auf Eye-Tracking Equipment zurückgreifen, welches über hohe Abtastraten (*sampling rate*) verfügt, sodass die aufgezeichneten Blickbewegungsdaten auch zur Analyse der kognitiven Belastung genutzt werden können.

In dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere im Vergleich zur Nutzung klassischen multimedialen Lernmaterials (Text und vorgegebene Abbildungen) die Anwendung der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens verstärkt dazu führt, dass Lernende sich mit den zentralen Stellen des Textes auseinandersetzen und sinnstiftende Verknüpfungen zwischen ihren depiktiven Zeichnungen und den deskriptiven Beschreibungen im Text herstellen. Da das Ziel der ersten Studie darin lag, in explorativer Weise über die Blickbewegungsmuster der Lernenden Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse des Selektierens und Integrierens während der Anwendung des sinnstiftenden Zeichnens auszumachen, wurde zugunsten eines einheitlichen Designs der Lernmaterialien darauf verzichtet, gemäß

¹⁹ Der aktuelle Forschungsdiskurs in der Cognitive Load Forschung dreht sich momentan um die Frage, ob drei verschiedene Arten der kognitiven Belastung angenommen werden können (*extraneous load*, *intrinsic load*, *germane load*; z. B. Naismith, Cheung, Ringsted & Cavalcanti, 2015; Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998; Young, van Merriënboer, Durning & Cate, 2014) oder ob der *germane load* nicht Teil des *intrinsic loads* sei und somit nur zwei Arten der kognitiven Belastung vorherrschen (z. B. Kalyuga, 2011; Leppink, van Gog, Paas & Sweller, 2015; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011).

dem *split-attention principle* (Ayres & Sweller, 2014) den Text möglichst weitgehend in die Abbildungen zu integrieren. Diesem Gestaltungsprinzip geht die Überlegung voraus, dass die Eliminierung der Notwendigkeit, distale Informationsquellen mental zu integrieren, die kognitive Belastung verringert und so mehr kognitive Ressourcen für den Lernprozess bereitstellen (Ayres & Sweller, 2014). Zukünftige Studien sollten daher untersuchen, ob sich die Vorteile der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichens im Hinblick auf die Selektions- und Integrationsprozesse auch dann noch finden lassen, wenn der Text in den Abbildungen integriert ist.

Vor dem Hintergrund, dass Lernenden häufig die geeigneten Strategien fehlen, um Bildinformationen richtig zu entnehmen und sie daher Abbildungen nur oberflächlich und unvollständig verstehen (z. B. Brandstetter-Korinth, 2017; Cheng & Gilbert, 2014; Cook et al., 2008; Kragten et al., 2013, 2015), könnten zukünftige Forschungsprojekte zum sinnstiftenden Zeichnen überprüfen, ob sich die Blickbewegungsmuster Lernender mit Zeicheninstruktion auch dann noch von denen Lernender mit einer Text-Bild-Kombination unterscheiden, wenn letztere ein Training zur Analyse von Abbildungen erhalten haben. Insbesondere komplexe Abbildungen können nicht vollständig „auf den ersten Blick“ erfasst werden, sondern müssen schrittweise anhand der oft zahlreichen Abbildungsdetails und Kodierungen von den Lernenden analysiert und entschlüsselt werden (Brandstetter-Korinth, 2017). Wären Lernende mit diesen Prozeduren vertraut, sollten sie sich intensiver mit den Abbildungen auseinandersetzen, sodass gegebenenfalls ähnliche Blickbewegungsmuster wie beim sinnstiftenden Zeichnen zu erwarten sind.

Die Wirksamkeit des sinnstiftenden Zeichnens auf Papier ist gut untersucht, jedoch gibt es erst wenige Studien, die z. B. ein Tablet zum Zeichnen eingesetzt haben (z. B. Schmidgall, 2017). Der Einsatz eines Tablets als Medium würde die Vorzüge des physischen Zeichenprozesses mit Vorzügen digitaler Medien kombinieren, sodass z. B. in multimedialen Lernumgebungen instruktionale Lernhilfen adaptiv hinzu- oder abgeschaltet werden könnten. Über Gestensteuerung könnte so beispielsweise eine Werkzeugleiste je nach Wissensstand selbstständig hinzugefügt oder ausgeblendet werden. Weiterhin wäre es möglich, durch das Antippen eines Fachbegriffs eine Erklärung des jeweiligen Wortes zu erhalten oder sogar die Blickbewegungsmuster erfahrener Strategieanwender auf dem Lernmaterial einzublenden.

Ein weiteres Forschungsfeld ergibt sich aus den neuen technischen Möglichkeiten, virtuelle Lernräume zu gestalten (*virtual reality*; VR) und über VR-Brillen höchst immersiv zu erleben. In der multimedialen Forschung gibt es bereits erste Studien, welche die Lernförderlichkeit virtueller Lernumgebungen und deren Einfluss auf die Motivation Lernender untersucht haben (z. B. Makransky, Terkildsen & Mayer, 2017; Moreno & Mayer, 2002; Parong & Mayer, 2018). Im Hinblick auf die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens gibt es bisher jedoch noch keine Untersuchungen mit immersiver virtueller Realität. Im Zusammenspiel mit dem Zeichnen auf einem Tablet könnten mithilfe von Programmen wie beispielsweise Microsofts Paint 3D zweidimensionale Zeichnungen erstellt und anschließend mit wenig Aufwand in dreidimensionale Objekte konvertiert werden, die wiederum mithilfe eines 3D-Druckers ausgedruckt werden können oder mit denen in einer virtuellen Realität interagiert werden kann. In diesem Zusammenhang könnte neben der Wirksamkeit einer solchen Lernumgebung weiterhin untersucht werden, wie sich die Interaktion mit selbst erstellten Objekten auf die Blickbewegungsmuster auswirkt, die als Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse gedeutet werden können.

Augmented reality (AR) bietet die Möglichkeit, digitale Objekte mithilfe eines Smartphones oder einer geeigneten AR-Brille in die reale Welt einzublenden und mit diesen zu interagieren (z. B. Dede, 2011; Kamarainen et al., 2013; Santos et al., 2016; Wu, Lee, Chang & Liang, 2013). Bisher gibt es jedoch nur wenige empirische Studien, welche die Wirksamkeit und das Potenzial von AR bei Bildungsinhalten untersucht haben (eine Übersicht bieten Santos et al., 2014). Der Vorteil der AR- gegenüber VR-Umgebungen liegt darin, dass Lernen in der realen Welt mit realen Objekten stattfinden kann und digitale Objekte in die reale Welt hinzugefügt werden, während in einer VR-Umgebung keine Interaktion mit physischen Objekten möglich ist und die Lernerfahrung vollkommen in der virtuellen Welt stattfindet. Zukünftige Forschungsprojekte zum sinnstiftenden Zeichnen könnten dementsprechend die Nützlichkeit von AR sowohl beim Zeichnen auf Papier als auch beim Zeichnen auf einem Tablet untersuchen. Ein Schwerpunkt könnte dabei auf dem adaptiven Hinzufügen von instruktionalen digitalen Hilfen in authentischen Umgebungen liegen. Weiterhin sollte untersucht werden, inwiefern die virtuelle Interaktion mit der Zeichnung (in 2D oder 3D) nach dem Zeichenprozess lernförderlich sein kann. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang, dass etwa mehrere Teilzeichnungen zu einem Text nach dem Lernprozess zu einer vollständigen Zeichnung zusammengesetzt werden, sodass ein großes (gegebenenfalls dreidimensionales) Prozessmodell entsteht oder verschiedene Stadien eines Prozesses zu einer finalen Animation hinzugefügt werden. Sowohl in AR- als auch VR-Umgebungen könnten zusätzlich die

Blickbewegungen der Lernenden aufgezeichnet und im Hinblick auf Indikatoren für kognitive Verarbeitungsprozesse untersucht werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens hinsichtlich ihrer Lernförderlichkeit zur Erfassung komplexer Sachtexte großes Potenzial besitzt. Die vorliegende Arbeit gewährt über die Analyse von Verhaltensspuren und Blickbewegungen einen Einblick in die dem sinnstiftenden Zeichnen zugrundeliegenden kognitiven Prozesse und ihrer metakognitiven Steuerung. Ausgehend von den in dieser Arbeit vorgestellten Befunden sollte daher das primäre Ziel zukünftiger Forschung zum sinnstiftenden Zeichnen sein, die im CMDC getroffenen Annahmen auf eine breite empirische Basis zu stellen. Insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Digitalisierung und ihrer Chancen für den Bildungssektor sollten zukünftige Forschungsprojekte den Einsatz und die Wirksamkeit der Lernstrategie des sinnstiftenden Zeichnens im Kontext verschiedener Medien überprüfen und das Potenzial hinsichtlich virtueller und augmentierter Lernräume untersuchen, sodass zukünftigen Generationen vielfältige Möglichkeiten offenstehen, sich komplexe Sachtexte sinnstiftend zu erschließen.

4.5 Literaturverzeichnis

- Ayres, P. & Sweller, J. (2014). The split-attention principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 206–226). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bartels, M. & Marshall, S. P. (2012). Measuring cognitive workload across different eye tracking hardware platforms. In C. H. Morimoto (Hrsg.), *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (S. 161). New York, NY: ACM.
- Brandstetter, M., Sandmann, A. & Florian, C. (2017). Understanding pictorial information in biology. Students' cognitive activities and visual reading strategies. *International Journal of Science Education*, 4 (1), 1–20.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1320454>
- Brandstetter-Korinth, M. (2017). *Abbildungen im Biologieunterricht [Diagrams in biology lessons]* (Biologie lernen und lehren, Bd. 19). Berlin: Logos.
- Braune, R. & Foshay, W. R. (1983). Towards a practical model of cognitive/information processing task analysis and schema acquisition for complex problem-solving situations. *Instructional Science*, 12 (2), 121–145. <https://doi.org/10.1007/BF00122453>
- Butcher, K. R. (2014). The multimedia principle. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 174–205). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.010>
- Cheng, M. M. W. & Gilbert, J. K. (2014). Students' visualization of diagrams representing the human circulatory system. The use of spatial isomorphism and representational conventions. *International Journal of Science Education*, 37 (1), 136–161.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2014.969359>
- Chi, M. T. H. (2009). Active-constructive-interactive. A conceptual framework for differentiating learning activities. *Topics in cognitive science*, 1 (1), 73–105.
<https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2008.01005.x>
- Chi, M. T. H. & Wylie, R. (2014). The ICAP Framework. Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes. *Educational Psychologist*, 49 (4), 219–243.
<https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>
- Chittleborough, G. & Treagust, D. F. (2008). Correct interpretation of chemical diagrams requires transforming from one level of representation to another. *Research in Science Education*, 38 (4), 463–482. <https://doi.org/10.1007/s11165-007-9059-4>

- Cook, M., Carter, G. & Wiebe, E. N. (2008). The interpretation of cellular transport graphics by students with low and high prior knowledge. *International Journal of Science Education*, 30 (2), 239–261. <https://doi.org/10.1080/09500690601187168>
- Costantino, T. M. (1986). Drawing: Homework for remedial readers. *The Reading Teacher*, 39 (7), 737–739. Zugriff am 30.01.2018. Verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/20199203>
- Dede, C. (2011). Emerging technologies, ubiquitous learning, and educational transformation. In C. D. Kloos, D. Gillet, R. M. Crespo García, F. Wild & M. Wolpers (Hrsg.), *Towards ubiquitous learning. 6th European Conference on Technology Enhanced Learning, EC-TEL 2011, Palermo, Italy, September 20 - 23, 2011; proceedings* (Lecture Notes in Computer Science, Bd. 6964, S. 1–8). Berlin: Springer.
- Deubel, H. & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition. Evidence for a common attentional mechanism. *Vision research*, 36 (12), 1827–1837. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00294-4)
- Eck, M., Hegemann, B., Marx, U. & Spieß, C. (2016). *Natura - Biologie für Gymnasien und Gesamtschulen [Natura - biology class textbook for higher track schools]* (1. Aufl.). Stuttgart: Ernst Klett Verlag.
- Fiorella, L. & Mayer, R. E. (2015). *Learning as a generative activity. Eight learning strategies that promote understanding*. New York: Cambridge University Press.
- Fisher, L. J. (1976). Language arts: Pictures tell the tale. *Teacher*, 93, 64–73.
- Gegenfurtner, A., Lehtinen, E., Jarodzka, H. & Säljö, R. (2017). Effects of eye movement modeling examples on adaptive expertise in medical image diagnosis. *Computers & Education*, 113, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.06.001>
- Gobert, J. D. & Clement, J. J. (1999). Effects of student-generated diagrams versus student-generated summaries on conceptual understanding of causal and dynamic knowledge in plate tectonics. *Journal of Research in Science Teaching*, 36 (1), 39. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199901\)36:1<39::AID-TEA4>3.3.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1<39::AID-TEA4>3.3.CO;2-9)
- Hall, V. C., Bailey, J. & Tillman, C. (1997). Can student-generated illustrations be worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 89 (4), 677–681. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.4.677>
- Hannus, M. & Hyönä, J. (1999). Utilization of illustrations during learning of science textbook passages among low- and high-ability children. *Contemporary Educational Psychology*, 24 (2), 95–123. <https://doi.org/10.1006/ceps.1998.0987>

- Hegarty, M. & Just, M. A. (1993). Constructing mental models of machines from text and diagrams. *Journal of Memory and Language*, 32 (6), 717–742.
<https://doi.org/10.1006/jmla.1993.1036>
- Heinze, C. & Matthes, E. (Hrsg.). (2010). *Das Bild im Schulbuch* (Klinkhardt Forschung). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.
- Hoffman, J. E. & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 57 (6), 787–795.
<https://doi.org/10.3758/BF03206794>
- Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P. & van Gog, T. (2010). In the eyes of the beholder. How experts and novices interpret dynamic stimuli. *Learning and Instruction*, 20 (2), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.019>
- Johnson, D. B. (1988). Show me what you mean: Student posters teach lengthy material. *Exercise Exchange*, 34, 44–46.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8 (4), 441–480. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3)
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading. From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87 (4), 329–354. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.4.329>
- Kalyuga, S. (2011). Cognitive load theory. How many types of load does it really need? *Educational Psychology Review*, 23 (1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9150-7>
- Kamarainen, A. M., Metcalf, S., Grotzer, T., Browne, A., Mazzuca, D., Tutwiler, M. S. et al. (2013). EcoMOBILE. Integrating augmented reality and probeware with environmental education field trips. *Computers & Education*, 68, 545–556.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.02.018>
- Klippert, H. (1999). *Methoden-Training. Übungsbausteine für den Unterricht*. Weinheim: Beltz.
- Koning, B. B. de, Tabbers, H. K., Rikers, R. M.J.P. & Paas, F. G. (2010). Attention guidance in learning from a complex animation. Seeing is understanding? *Learning and Instruction*, 20 (2), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.010>
- Kragten, M., Admiraal, W. & Rijlaarsdam, G. (2013). Diagrammatic literacy in secondary science education. *Research in Science Education*, 43 (5), 1785–1800.
<https://doi.org/10.1007/s11165-012-9331-0>

- Kragten, M., Admiraal, W. & Rijlaarsdam, G. (2015). Students' Learning Activities While Studying Biological Process Diagrams. *International Journal of Science Education*, 37 (12), 1915–1937. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1057775>
- Kühl, T., Stebner, F., Navratil, S. C., Fehringer, B. C. O. F. & Münzer, S. (2017). Text information and spatial abilities in learning with different visualizations formats. *Journal of Educational Psychology*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1037/edu0000226>
- Larkin, J. H. & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11 (1), 65–100. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6708.1987.tb00863.x>
- Leopold, C. & Leutner, D. (2012). Science text comprehension: Drawing, main idea selection, and summarizing as learning strategies. *Learning and Instruction*, 22 (1), 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.05.005>
- Leppink, J., Paas, F. G., van der Vleuten, C. P. M., van Gog, T. & van Merriënboer, J. J. G. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, 45 (4), 1058–1072. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0334-1>
- Leppink, J., van Gog, T., Paas, F. G. & Sweller, J. (2015). Cognitive load theory: researching and planning teaching to maximise learning. In J. A. Cleland & S. J. Durning (Hrsg.), *Researching medical education* (S. 207–218). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Leutner, D. & Schmeck, A. (2014). The generative drawing principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 433–448). Cambridge: Cambridge University Press.
- Makransky, G., Terkildsen, T. S. & Mayer, R. E. (2017). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>
- Marshall, S. P. (2007). Identifying cognitive state from eye metrics. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 78 (5 Suppl.), B165–B175.
- Mason, L., Lowe, R. K. & Tornatora, M. C. (2013). Self-generated drawings for supporting comprehension of a complex animation. *Contemporary Educational Psychology*, 38 (3), 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2013.04.001>
- Mason, L., Pluchino, P., Tornatora, M. C. & Ariasi, N. (2013). An Eye-Tracking Study of Learning From Science Text With Concrete and Abstract Illustrations. *The Journal of*

- Experimental Education*, 81 (3), 356–384.
<https://doi.org/10.1080/00220973.2012.727885>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2. Aufl.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2014a). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 43–71). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (Hrsg.). (2014b). *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>
- McConnell, S. (1993). Talking drawings: A strategy for assisting learners. *Journal of Reading*, 36 (4), 260–269. Verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/40016629>
- Moore, B. H. & Caldwell, H. (1993). Drama and drawing for narrative writing in primary grades. *The Journal of Educational Research*, 87 (2), 100–110.
<https://doi.org/10.1080/00220671.1993.9941173>
- Moreno, R. & Mayer, R. E. (2002). Learning science in virtual reality multimedia environments. Role of methods and media. *Journal of Educational Psychology*, 94 (3), 598–610. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.3.598>
- Naismith, L. M., Cheung, J. J. H., Ringsted, C. & Cavalcanti, R. B. (2015). Limitations of subjective cognitive load measures in simulation-based procedural training. *Medical education*, 49 (8), 805–814. <https://doi.org/10.1111/medu.12732>
- Paas, F. G. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 84 (4), 429–434.
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.429>
- Parong, J. & Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*. <https://doi.org/10.1037/edu0000241>
- Rayner, K., McConkie, G. W. & Ehrlich, S. (1978). Eye movements and integrating information across fixations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4 (4), 529–544. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.4.4.529>
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139062367>
- Santos, M. E. C., Chen, A., Taketomi, T., Yamamoto, G., Miyazaki, J. & Kato, H. (2014). Augmented Reality Learning Experiences. Survey of Prototype Design and Evaluation. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 7 (1), 38–56.
<https://doi.org/10.1109/TLT.2013.37>

- Santos, M. E. C., Lübke, A. i. W., Taketomi, T., Yamamoto, G., Rodrigo, M. M. T., Sandor, C. et al. (2016). Augmented reality as multimedia. The case for situated vocabulary learning. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 11 (1), 340. <https://doi.org/10.1186/s41039-016-0028-2>
- Schmeck, A., Mayer, R. E., Opfermann, M., Pfeiffer, V. & Leutner, D. (2014). Drawing pictures during learning from scientific text: Testing the generative drawing effect and the prognostic drawing effect. *Contemporary Educational Psychology*, 39 (4), 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2014.07.003>
- Schmidgall, S. P. (2017). *Drawing to learn. Investigating the role of contributing factors and instructional support for learner-generated drawing*. Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen. Tübingen, Germany. <https://doi.org/10.15496/publikation-18678>
- Schnotz, W. (2014). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. Aufl., S. 72–103). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13 (2), 141–156. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8)
- Schurf, B. & Wagener, A. (Hrsg.). (2015). *Deutschbuch [German class textbook]* (1. Aufl.). Berlin: Cornelsen.
- Schwamborn, A., Mayer, R. E., Thillmann, H., Leopold, C. & Leutner, D. (2010). Drawing as a generative activity and drawing as a prognostic activity. *Journal of Educational Psychology*, 102 (4), 872–879. <https://doi.org/10.1037/a0019640>
- Schwamborn, A., Thillmann, H., Leopold, C., Sumfleth, E. & Leutner, D. (2010). Der Einsatz von vorgegebenen und selbst generierten Bildern als Textverstehenshilfe beim Lernen aus einem naturwissenschaftlichen Sachtext [Using presented and self-generated pictures as learning aids for learning from science text]. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 24 (3), 221–233. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000018>
- Schwonke, R., Berthold, K. & Renkl, A. (2009). How multiple external representations are used and how they can be made more useful. *Applied Cognitive Psychology*, 23 (9), 1227–1243. <https://doi.org/10.1002/acp.1526>
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning and Instruction*, 13 (2), 227–237. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00022-1)

- Snyder, J. L. (2000). An investigation of the knowledge structures of experts, intermediates and novices in physics. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 979–992. <https://doi.org/10.1080/095006900416866>
- Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory* (Explorations in the learning sciences, instructional systems and performance technologies). New York: Springer.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10 (3), 251–296. <https://doi.org/10.1023/a:1022193728205>
- Underwood, G., Humphrey, K. & Foulsham, T. (2008). Knowledge-based patterns of remembering: Eye movement scanpaths reflect domain experience. In A. Holzinger (Hrsg.), *HCI and usability for education and work. 4th symposium for the workgroup human-computer interaction and usability engineering of the austrian computer society, USAB 2008, Graz, Austria, November 20-21, 2008 , proceedings* (Lecture Notes in Computer Science, Bd. 5298, S. 125–144). Berlin: Springer.
- Van Gog, T. & Jarodzka, H. (2013). Eye tracking as a tool to study and enhance cognitive and metacognitive processes in computer-based learning environments. In R. Azevedo & V. Aleven (Hrsg.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (Springer International Handbooks of Education, Bd. 28, S. 143–156). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3_10
- Van Gog, T., Paas, F. G., van Merriënboer, J. J. G. & Witte, P. (2005). Uncovering the problem-solving process. Cued retrospective reporting versus concurrent and retrospective reporting. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11 (4), 237–244. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.4.237>
- Van Meter, P. (2001). Drawing construction as a strategy for learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 93 (1), 129–140. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.93.1.129>
- Van Meter, P., Aleksic, M., Schwartz, A. & Garner, J. (2006). Learner-generated drawing as a strategy for learning from content area text. *Contemporary Educational Psychology*, 31 (2), 142–166. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2005.04.001>
- Van Meter, P. & Firetto, C. M. (2013). Cognitive model of drawing construction. Learning through the construction of drawings. In G. J. Schraw, M. T. McCrudden & D. R. Robinson (Hrsg.), *Learning through visual displays* (Current perspectives on cognition, learning, and instruction, S. 247–380). Charlotte, N.C.: Information Age Publishing.

- Wagner, W., Helmke, A. & Rösner, E. (2009). *Deutsch Englisch Schülerleistungen international: Dokumentation der Erhebungsinstrumente für Schülerinnen und Schüler, Eltern und Lehrkräfte* [German English student proficiency international: Documentation of assessment instruments for students, parents, and teachers] (Materialien zur Bildungsforschung, 25,1). Frankfurt, M.: GfPF; DIPF.
- Waters, J. R., van Meter, P., Perrotti, W., Drogo, S. & Cyr, R. J. (2005). Cat dissection vs. sculpting human structures in clay. An analysis of two approaches to undergraduate human anatomy laboratory education. *Advances in physiology education*, 29 (1), 27–34. <https://doi.org/10.1152/advan.00033.2004>
- Waters, J. R., van Meter, P., Perrotti, W., Drogo, S. & Cyr, R. J. (2011). Human clay models versus cat dissection. How the similarity between the classroom and the exam affects student performance. *Advances in physiology education*, 35 (2), 227–236. <https://doi.org/10.1152/advan.00030.2009>
- Weis, M., Zehner, F., Sälzer, C., Strohmaier, C. & Pfost, M. (2016). Lesekompetenz in PISA 2015: Ergebnisse, Veränderungen und Perspektiven. In K. Reiss, C. Sälzer, A. Schiepe-Tiska, E. Klieme & O. Köller (Hrsg.), *PISA 2015. Eine Studie zwischen Kontinuität und Innovation* (S. 249–283). Münster: Waxmann.
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y. & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
- Young, J. Q., van Merriënboer, J. J. G., Durning, S. J. & Cate, O. ten. (2014). Cognitive load theory. Implications for medical education: AMEE Guide No. 86. *Medical teacher*, 36 (5), 371–384. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2014.889290>
- Zagermann, J., Pfeil, U. & Reiterer, H. (2016). Measuring cognitive load using eye tracking technology in visual computing. In M. Sedlmair (Hrsg.), *BELIV 2016. Proceedings : Beyond Time and Errors: Novel Evaluation Methods for Visualization : sixth bi-annual workshop : Baltimore, Maryland, USA, October 24, 2016* (ICPS, S. 78–85). New York, New York: The Association for Computing Machinery.

Tabellenverzeichnis

Table 1: Four Eye-Tracking Measures Indicating Cognitive Processing During Learning.	76
Table 2: Medians, Means and Standard Deviations of Two Groups on Three Learning Outcome Measures and Four Learning Process Measures for Experiment 1.....	85
Table 3: Means and Standard Deviations of Two Groups on Three Learning Outcome Measures and Four Learning Process Measures for Experiment 2.	92
Table 4: Medians, Means, and Standard Deviations of Two Groups on Prior Knowledge, Drawing Accuracy During Learning, and Three Learning Outcome Measures.....	119
Table 5: Medians, Means, and Standard Deviations of Two Groups on Four Indicators of Cognitive Processing.	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Cognitive Theory of Multimedia Learning (Mayer, 2014a, S. 66; eigene Übersetzung).....	7
Abbildung 2: Theoretisches Grundgerüst zur Analyse des Text- und Bildverstehens von Schnotz und Bannert (2003); nach Schnotz (2014, S. 79; eigene Übersetzung).....	11
Abbildung 3: Das Integrated Model of Text and Picture Comprehension (Schnotz, 2014, S. 83; eigene Übersetzung).....	13
Abbildung 4: Die Generative Theory of Drawing Construction (van Meter & Garner, 2005); in Anlehnung an die Darstellung von Schmeck (2010, S. 29).....	19
Abbildung 5: Das Cognitive Model of Drawing Construction (van Meter & Firetto, 2013, S. 256; eigene Übersetzung).....	22
Abbildung 6: Eye-Tracking-Brille der Firma SensoMotoric Instruments, Modell: SMI ETG 1.5 (eigene Abbildung).....	33
Abbildung 7: Bild eines linken Auges während des Eye-Trackings (eigene Abbildung)...	33
Abbildung 8: Beispiel für den Einsatz der Eye-Tracking-Brille bei der Bearbeitung der Lernmaterialien (eigene Abbildungen).....	41
Figure 9: Second text paragraph of the immunology lesson for both groups: Example for text, two-part drawing prompt (left), and author-generated picture (right). Note: Translated from the German original.....	78
Figure 10: Areas of interests (AOIs) for the drawing group (left) and the picture group (right) for the third page of the learning material. On the left side of each page is the text AOI (with the important-text AOI included in the lower part), and on the right side of each page is the workspace AOI.....	83
Figure 11: Second text paragraph of the immunology lesson for both groups: Example for text, two-part drawing prompt (left), and two-part summarizing prompt (right). Note: Translated from the German original.....	89
Figure 12: Areas of interests (AOIs) for the drawing group (left) and the summarizing group (right) for the third page of the learning material. On the left side of each page is the text AOI (with the important-text AOI included in the lower part), and on the right side of each page is the workspace AOI.....	90

Figure 13: Second page of the immunology lesson: Example for text (left) and two-part drawing prompt (right). Note: Translated from the German original.....	114
Figure 14: Areas of interests (AOIs) for the third page of the immunology lesson. On the left side is the text AOI (with the important-text AOI included in the lower part), and on the right side is the workspace AOI.....	117

Abkürzungsverzeichnis

ANCOVA	Analysis of Covariance (Kovarianzanalyse)
AOI	Area of Interest
AR	Augmented Reality
CMDC	Cognitive Model of Drawing Construction
CTML	Cognitive Theory of Multimedia Learning
d	Cohens d ; Effektstärkenmaß
df	Degrees of Freedom (Anzahl der Freiheitsgrade)
EMME	Eye movement modeling examples
F	Prüfgröße der Kovarianzanalyse
FAM	Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation
GTDC	Generative Theory of Drawing Construction
ICC	Intra-Class-Correlation (Intra-Klassen-Korrelation); Quantifizierungsmaß der Übereinstimmung zwischen mehreren Beurteilern
IGLU	Internationale-Grundschul-Lese-Untersuchung
ITPC	Integrated Model of Text and Picture Comprehension
KFT	Kognitiver Fähigkeitstest
M	Mittelwert
Mdn	Median
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
p	Signifikanzwert
PISA	Programme for International Student Assessment
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson; Effektstärkenmaß
r_s	Korrelationskoeffizient nach Spearman
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SMI	SensoMotoric Instruments
t	Prüfgröße des t-Tests
U	Prüfgröße Mann-Whitney Test
VR	Virtual Reality
z	Prüfgröße Mann-Whitney Test; Differenz eines Rohwertes vom Mittelwert unter Berücksichtigung des Standardfehlers des U-Werts
η_p^2	Partielles Eta-Quadrat; korrigiertes Effektstärkemaß in Gruppenvergleichen
χ^2	Prüfgröße des Chi-Quadrat-Tests nach Pearson

Anhang

Anhang A: Ausgewählte Erhebungsinstrumente

Angaben zur Person

Wie alt bist du? _____ Jahre	Geschlecht: <input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> männlich
Ich trage ...	
<input type="checkbox"/> ... eine Brille. <input type="checkbox"/> ... Kontaktlinsen. <input type="checkbox"/> ... keine Brille / Kontaktlinsen.	
In welcher Klasse (z.B. 9a) bist du im Moment?	_____
Welche Sprache(n) sprichst du zu Hause? <i>(Wenn du mehrere Sprachen mit deiner Familie sprichst, schreibe sie bitte alle auf.)</i>	_____ _____
Deine letzte Zeugnisnote im Fach Chemie:	_____
Deine letzte Zeugnisnote im Fach Biologie:	_____
Deine letzte Zeugnisnote im Fach Mathematik:	_____
Deine letzte Zeugnisnote im Fach Deutsch:	_____

Fragebogen zur Nutzung bekannter Lernstrategien

(adaptiert nach Wagner et al., 2008)

<u>Lernstrategien</u>					
Wie gehst du vor, wenn du mit einem Text sehr gründlich lernst (z.B. mit einem Text aus deinem Deutschbuch für den Unterricht)? <u>Bitte mache in jeder Zeile nur ein Kreuz!</u>					
	Die Strategie kenne ich nicht .	Die Strategie kenne ich und verwende sie ...			
		... nie oder fast nie.	... manch- mal.	... oft.	... fast immer.
Ich streiche Textstellen an, z.B. mit einem Textmarker.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich mache mir Notizen, z.B. am Textrand oder auf einem Blatt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich mache mir bildliche, skizzenhafte Zeichnungen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich nehme mir Zeit, um über das, was ich gelesen habe, nachzudenken.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich erstelle mir eine Zusammenfassung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich erstelle ein Ablaufdiagramm / Flussdiagramm.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich erstelle eine Concept Map.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich lese den Text / einzelne Textstellen mehrfach durch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich lese mir meine Notizen / Zeichnungen etc. mehrfach durch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich gehe ganz anders vor und zwar ...		_____			

Vorwissens- und Behaltenstest

(adaptiert nach Schmeck et al., 2014)

<p>1. Welche Zellen besitzen einen Zellkern?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> T-Helferzellen, Körperzellen, Fresszellen. <input type="checkbox"/> Körperzellen, Viren, Fresszellen. <input type="checkbox"/> Viren, Körperzellen, T-Helferzellen. <input type="checkbox"/> nur Viren. <p>2. Was ist ein Baustein von Glykoproteinen?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Antikörper <input type="checkbox"/> Antipodien <input type="checkbox"/> Antigen <input type="checkbox"/> Antivirus <p>3. Was geschieht bei der Vermehrung von Influenza-Viren?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kapsel und Membran entstehen außerhalb der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Die Membran entsteht im Inneren der Körperzelle und erhält eine Kapsel beim Verlassen der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Vakuole und Zellkern entstehen innerhalb der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Die Kapsel entsteht im Inneren der Körperzelle und erhält eine Membran beim Verlassen der Körperzelle. <p>4. Wie groß ist eine Körperzelle im Vergleich zu einem Influenza-Virus?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Eine Körperzelle ist kleiner als das Virus. <input type="checkbox"/> Eine Körperzelle ist genauso groß wie das Virus. <input type="checkbox"/> Eine Körperzelle ist größer als das Virus. <input type="checkbox"/> Eine Körperzelle ist je nach Virus entweder größer oder kleiner. <p>5. Was ist die Funktion der Vakuole, die sich innerhalb der Fresszelle während der Reaktion des Körpers auf die Grippe ausbildet?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Neue Bausteine für Antikörper produzieren. <input type="checkbox"/> Influenza-Viren in ihre Bausteine zersetzen. <input type="checkbox"/> Neue Bausteine für T-Helferzellen produzieren. <input type="checkbox"/> Infizierte Körperzelle in ihre Bausteine zersetzen. 	<p>6. Wie gelangt ein Influenza-Virus in eine Körperzelle?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Membran des Influenza-Virus umfließt die Körperzelle. <input type="checkbox"/> Das Influenza-Virus frisst die Körperzelle auf. <input type="checkbox"/> Die Membran des Influenza-Virus verschmilzt mit der Membran der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Das Influenza-Virus dockt mit seinen Pseudopodien an die Körperzelle an. <p>7. Was ist die Funktion der Pseudopodien auf den Fresszellen?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Sie verklumpen die Influenza-Viren. <input type="checkbox"/> Sie umfließen das Influenza-Virus, bis sie es ganz umschließen. <input type="checkbox"/> Sie werden vom Influenza-Virus umschlossen und zersetzen es von innen. <input type="checkbox"/> Sie ersetzen die Glykoproteine auf der Membran des Influenza-Virus. <p>8. Worin unterscheiden sich das Influenza-Virus und die Körperzelle?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Das Influenza-Virus hat keine Antikörper. <input type="checkbox"/> Die Körperzelle hat keine Antikörper. <input type="checkbox"/> Das Influenza-Virus hat einen Zellkern. <input type="checkbox"/> Die Körperzelle hat einen Zellkern. <p>9. Wie groß ist ein Influenza-Virus?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Etwa zehnmal so klein wie eine Körperzelle. <input type="checkbox"/> Etwa zehnmal so groß wie eine Körperzelle. <input type="checkbox"/> Etwa doppelt so klein wie eine Körperzelle. <input type="checkbox"/> Etwa doppelt so groß wie eine Körperzelle. <p>10. Was gehört zu einer Fresszelle?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zellkern, Kapsel und Pseudopodien. <input type="checkbox"/> Zellmembran, Zellkern und Pseudopodien. <input type="checkbox"/> Zellmembran, Antikörper und Pseudopodien. <input type="checkbox"/> Zellkern, Antikörper und Pseudopodien.
<p>11. Was geschieht mit einer Körperzelle, wenn ein Virus in sie eindringt?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Membran und die Glykoproteine des Influenza-Virus verbleiben an der Außenseite der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Die Kapsel des Influenza-Virus verbleibt an der Außenseite der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Die Membran und die Glykoproteine des Influenza-Virus wandern ins Innere der Körperzelle. <input type="checkbox"/> Das Influenza-Virus wird in eine Vakuole eingeschlossen. <p>12. Was bewirkt die Bindung zwischen T-Helferzelle und Fresszelle im Körper?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Entstehung von Antigenen. <input type="checkbox"/> Die Entstehung von Antiviren. <input type="checkbox"/> Die Entstehung von Antikörpern. <input type="checkbox"/> Die Entstehung von Antipodien. <p>13. Woraus ist eine Körperzelle aufgebaut?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kapsel und Membran. <input type="checkbox"/> Kapsel und Glykoproteine. <input type="checkbox"/> Zellkern und Membran. <input type="checkbox"/> Zellkern und Pseudopodien. <p>14. Was charakterisiert Antikörper besonders?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mit ihrer Y-Form können sie zwei Fresszellen auf einmal binden. <input type="checkbox"/> Mit ihrer Y-Form können sie zwei Zellkerne auf einmal binden. <input type="checkbox"/> Mit ihrer Y-Form können sie zwei Pseudopodien auf einmal binden. <input type="checkbox"/> Mit ihrer Y-Form können sie zwei Influenza-Viren auf einmal binden. <p>15. Wo „präsentiert“ die Fresszelle Antigene?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Innerhalb der Vakuole. <input type="checkbox"/> Auf ihrer Zellmembran. <input type="checkbox"/> Auf den Pseudopodien. <input type="checkbox"/> Innerhalb ihres Zellkerns. 	<p>16. Warum ist die Produktion neuer Influenza-Viren für den Körper schlecht?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Je mehr neue Influenza-Viren es gibt, desto weniger Fresszellen können erzeugt werden. <input type="checkbox"/> Je mehr neue Influenza-Viren es gibt, desto mehr Körperzellen können befallen werden. <input type="checkbox"/> Je mehr neue Influenza-Viren es gibt, desto weniger Antikörper können produziert werden. <input type="checkbox"/> Je mehr neue Influenza-Viren es gibt, desto weniger T-Helferzellen können befallen werden. <p>17. Wodurch wird eine Ausbreitung der Influenza-Viren im Körper vermieden?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Durch Antikörper-Viren-Klumpen. <input type="checkbox"/> Durch Antigen-Viren-Klumpen. <input type="checkbox"/> Durch Fresszellen-Viren-Klumpen. <input type="checkbox"/> Durch T-Helferzellen-Viren-Klumpen. <p>18. Die Fresszelle frisst ein Influenza-Virus und „präsentiert“ dessen Antigene. Was geschieht?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Antikörper der Glykoproteine docken daran an. <input type="checkbox"/> Die Zellmembranen der Körperzellen docken daran an. <input type="checkbox"/> Die Proteine der T-Helferzellen docken daran an. <input type="checkbox"/> Die Pseudopodien der Fresszellen docken daran an. <p>19. Woraus besteht ein Influenza-Virus?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kapsel, Membran und Antikörper. <input type="checkbox"/> Kapsel, Membran und Glykoproteine. <input type="checkbox"/> Antikörper, Membran und Glykoproteine. <input type="checkbox"/> Zellkern, Kapsel und Membran.

Transferwissenstest

(adaptiert nach Schmeck et al., 2014)

1. T-Helferzellen erkennen nicht nur Viren, sondern generell körperfremde Stoffe und Zellen. Welches Medikament würdest du daher geben, wenn jemand gerade eine neue Niere erhalten hat?

- ☐ Eines, das die Immunreaktion des Körpers unterdrückt.
- ☐ Eines, das die Immunreaktion des Körpers aktiviert.
- ☐ Eines, das Antigene enthält.
- ☐ Eines, das Blut des Nierenspenders enthält.

2. T-Helferzellen im Blut erkennen außer Viren auch körperfremde Zellen, z.B. von anderen Menschen. Du möchtest herausfinden, ob eine Blutprobe von Frau Meier stammt. Dazu gibst du etwas Blut von der Probe und Blut von Frau Meier in ein Reagenzglas.

Welche der folgenden Schlussfolgerungen ist richtig?

- ☐ Es kann nicht herausgefunden werden, ob die Blutprobe von Frau Meier ist, da es immer zu einer Verklumpung kommt.
- ☐ Wenn die Blutprobe von Frau Meier ist, kommt es nicht zu einer Verklumpung, da sich im Reagenzglas nur T-Helferzellen von Frau Meier befinden, die nicht mit ihrem eigenen Blut reagieren.
- ☐ Es kann nicht herausgefunden werden, ob die Blutprobe von Frau Meier ist, da es nie zu einer Verklumpung kommt.
- ☐ Wenn die Blutprobe von Frau Meier ist, kann man eine Verklumpung beobachten, weil die T-Helferzellen an die Antigene ihres Bluts binden.

3. T-Killerzellen sehen ganz ähnlich aus wie T-Helferzellen. T-Killerzellen vernichten von Viren befallene Körperzellen. Wodurch erkennen die T-Killerzellen diese?

- ☐ An der Vakuole der Körperzelle.
- ☐ An den Klumpen, die infizierte Körperzellen mit den Fresszellen bilden.
- ☐ An den Pseudopodien, die sich durch die Verschmelzung der Viren und der Körperzelle bilden.
- ☐ An den Glykoproteinen der Viren, die sich durch die Membranverschmelzung nun in der Membran der Körperzelle befinden.

4. Körperfremde Stoffe und Zellen werden wie Viren von T-Helferzellen erkannt. Unterschiedliche Menschen haben verschiedene Blutgruppen. Das bedeutet, dass sich auf der Oberfläche ihrer roten Blutkörperchen unterschiedliche Antigene befinden. Menschen mit der Blutgruppe A besitzen andere Antigene auf der Oberfläche der roten Blutkörperchen als Menschen mit der Blutgruppe B.

Was geschieht, wenn ein Mensch der Blutgruppe A bei einer Bluttransfusion Blut der Blutgruppe B erhält?

- ☐ T-Helferzellen des Menschen mit der Blutgruppe A binden an die Blutkörperchen des Blutes der Blutgruppe B und verklumpen diese.
- ☐ Makrophagen des Menschen der Blutgruppe A verklumpen die roten Blutkörperchen der Blutgruppe B.
- ☐ Der Mensch der Blutgruppe A bildet gegen das Spenderblut der Blutgruppe B Antikörper und verklumpt es.
- ☐ Dem Menschen mit der Blutgruppe A müssen harmlose Viren geimpft werden, die die fremden Blutkörperchen der Blutgruppe B verklumpen.

5. Amöben sind Einzeller, die Nahrung aufnehmen, indem sie Pseudopodien ausbilden, mit denen sie die Nahrung umfließen und sich einverleiben. Auch im menschlichen Körper gibt es Zellen, die Stoffe umfließen und sie so auffressen. Welche Zellen sind das?

- ☐ T-Helferzellen
- ☐ Fresszellen
- ☐ Mit Viren infizierte Körperzellen
- ☐ T-Killerzellen

6. Du hast dich mit dem Traumvirus infiziert. Gegen diesen Virus gibt es im Körper keine T-Helferzelle. Was geschieht?

- ☐ Der Körper kann keine Antikörper herstellen und ich bekomme die Traumkrankheit.
- ☐ Die Fresszelle kann den Traumvirus nicht fressen und ich bekomme die Traumkrankheit.
- ☐ Der Körper kann keine Antigene herstellen und ich bekomme die Traumkrankheit.
- ☐ Glykoproteine umhüllen das Traumvirus und ich bekomme die Traumkrankheit.

7. In eine von Annas Körperzellen ist ein Hepatitis-Virus eingedrungen. Wenn wir annehmen, dass alles genauso abläuft wie beim Influenza-Virus, wo befinden sich dann die Glykoproteine des Hepatitis-Virus?

- ☐ Die Glykoproteine des Hepatitis-Virus befinden sich außerhalb der Körperzelle und haben keinen Kontakt mit der Oberfläche der Körperzelle, weil der Hepatitis-Virus die Glykoproteine vor dem Eindringen abwirft.
- ☐ Die Glykoproteine befinden sich auf der Hüllmembran des Hepatitis-Virus, die beim Eindringen mit ins Innere der Körperzelle gewandert ist.
- ☐ Die Glykoproteine werden beim Eindringen des Hepatitis-Virus in die Körperzelle vernichtet.
- ☐ Die Glykoproteine des Hepatitis-Virus befinden sich auf der Oberfläche der Körperzelle, weil die Hüllmembran des Virus mit der Zellmembran der Körperzelle beim Eindringen verschmolzen ist.

8. Du hast eine Grippe und in deinem Körper befinden sich bereits viele Antikörper, welche die Influenza-Viren verklumpen. Nun dringen auch noch Herpes-Viren in einige deiner Körperzellen ein und vermehren sich. Das heißt also, dass sich zusätzlich zu den Influenza-Viren jetzt auch noch viele Herpes-Viren im Körper befinden.

Können die gleichen Antikörper, welche die Influenzaviren verklumpen, auch die Herpes-Viren verklumpen?

- ☐ Ja, das ist möglich, weil nur T-Helferzelle und Antigene wie ein Schlüssel zu einem Schloss passen müssen. Zwischen Virus und Antikörper muss keine Schlüssel-Schloss-Bindung bestehen.
- ☐ Nein, das ist nicht möglich, weil die Bindung zwischen Virus und Antikörper nur zustande kommt, wenn die beiden wie ein Schlüssel zu einem Schloss passen.
- ☐ Ja, das ist möglich, weil ein und derselbe Antikörper viele verschiedene Viren, also auch Herpes- und Influenza-Viren, miteinander verklumpen kann.
- ☐ Nein, das ist nicht möglich, weil Influenza-Viren die einzigen Viren sind, die Antigene haben und für die somit Antikörper hergestellt werden können.

9. Das Hormon Insulin erreicht über das Blut die Körperzellen und fordert diese dazu auf, überschüssigen Zucker aus dem Blut aufzunehmen. Dazu bindet Insulin an eine Körperzelle. Diese Bindung funktioniert nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip. Was funktioniert auch nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip?

- ☐ Das Umfließen der Viren durch Pseudopodien.
- ☐ Die Bindung von Viren untereinander.
- ☐ Die Bindung zwischen Antikörpern und Viren.
- ☐ Das Umfließen der Körperzellen durch Fresszellen.

Zeichentest

(adaptiert nach Schmeck et al., 2014)

1. Skizziere in **zwei Schritten**, wie ein Influenza-Virus in eine Körperzelle **eindringt** und wie es sich **vermehrt**.
2. Skizziere in **zwei Schritten**, wie eine **Fresszelle** ein Influenza-Virus **umfließt** und **aufnimmt**.
3. Skizziere in **zwei Schritten**, wie eine Fresszelle die Antigene des Virus **präsentiert** und eine **passende** T-Helferzelle an die Fresszelle **bindet**.
4. Skizziere die **Bindung** zwischen **Influenza-Viren** und passenden **Antikörpern**.

Fragebogen zur Erfassung der Benutzerfreundlichkeit der Eye-Tracking-Brille

(Hellenbrand, 2018)

	trifft nicht zu						trifft zu
Den Tragekomfort der Eye-Tracking-Brille empfand ich als angenehm.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Ich habe beim Bearbeiten des Textes die Eye-Tracking-Brille überhaupt nicht wahrgenommen.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Die Anweisungen für die Kalibrierung der Brille habe ich auf Anhieb verstanden.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Ich habe mich durch das Tragen der Brille eingeschränkt gefühlt.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Ich hatte das Gefühl, mich durch das Tragen der Brille unnatürlich zu bewegen.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Das Tragen der Brille hat mich beim Lesen gestört.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Das Tragen der Brille hat mich beim Zeichnen gestört.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Ich habe mich während des Eye Trackings unwohl gefühlt.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Ich habe nach dem Tragen der Brille Kopfschmerzen.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Meine Augen fühlen sich nach dem Tragen der Brille sehr angestrengt an.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Ich hätte die Brille noch länger tragen können.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

Anhang B: Lerntext zur Immunreaktion des Körpers bei einer Infektion mit Influenzaviren

(adaptiert nach Schmeck et al., 2014)

Hinweis: Der Lerntext ist hier in reiner Textform abgedruckt. In den drei Studien dieser Arbeit wurde der Text gemäß Figure 9, 11 und 13 präsentiert.

I Das Influenza-Virus dringt in eine Körperzelle ein

Um zu verstehen, wie ein Influenza-Virus in eine Körperzelle gelangt, ist es hilfreich, sich zunächst mit dem Aussehen von beiden zu beschäftigen. Das Influenza-Virus besteht aus einer Kapsel. Auf der Kapsel des Influenza-Virus liegt eine Hüllmembran, aus der Glykoproteine herausragen. Du kannst dir diese Glykoproteine wie kleine Pfeile vorstellen, die mit ihrem Stiel in der Hüllmembran verankert sind.

Körperzellen sind im Vergleich zum Influenza-Virus mehr als zehnmal so groß und von einer Zellmembran umgeben, besitzen in ihrem Inneren aber im Gegensatz zum Influenza-Virus einen Zellkern.

Wenn ein Influenza-Virus in eine Körperzelle gelangt, durchschreitet es die Zellmembran der Körperzelle und dringt so in sie ein. Dabei verliert das Influenza-Virus seine eigene äußere Hüllmembran. Sie verschmilzt mit der äußeren Zellmembran der Körperzelle. Die Glykoproteine des Influenza-Virus verbleiben durch diese Verschmelzung an der Außenseite der Zellmembran der Körperzelle. Du kannst dir dies ungefähr so vorstellen, dass aus der Zellmembran der Körperzelle die pfeilförmigen Glykoproteine des Influenza-Virus herausragen. Im Inneren der Körperzelle befindet sich hingegen nur die Kapsel des Influenza-Virus.

II Das Influenza-Virus vermehrt sich

In der Körperzelle sorgt das Influenza-Virus dafür, dass die Körperzelle viele neue Influenza-Virus-Bausteine herstellt. Die Kapseln setzen sich hierbei bereits im Inneren der Körperzelle zusammen. Die Glykoproteine wandern hingegen zur Zellmembran der Körperzelle, wo sie wiederum an der Außenseite herausragen. Neu gebildete Influenza-Viruskapseln verlassen die Körperzelle. Bei ihrem Austritt entsteht aus der Membran der Körperzelle die neue Hüllmembran der Viren, die auch die Glykoproteine enthält. Auf diese Weise entstehen viele neue Viren, die sich außerhalb der bereits infizierten Körperzelle befinden.

III Fresszellen umfließen das Influenza-Virus

Wie du im letzten Abschnitt gelesen hast, sorgt das Influenza-Virus in der Körperzelle dafür, dass viele neue Viren in ihrem Inneren hergestellt werden. Dies muss unbedingt verhindert werden, denn je mehr neue Viren es gibt, desto mehr Körperzellen können auch befallen werden.

Fresszellen, die sich im Körper teilweise frei bewegen können, spielen nun eine wichtige Rolle. Fresszellen sind von einer Zellmembran umgeben und tragen in ihrem Inneren einen Zellkern. Eine Fresszelle sieht aus wie eine Kugel, aus der überall Körperteile - die sogenannten Pseudopodien - herausragen. Mit diesen Pseudopodien kann die Fresszelle ein Influenza-Virus umfließen, das im Körper eingedrungen ist. Du kannst dir dies ungefähr so vorstellen, dass die Fresszelle wie ein Krake mit ihren Armen das Influenza-Virus umschlingt.

IV Fresszellen nehmen das Influenza-Virus auf

Die Fresszelle umfließt das Influenza-Virus, bis sie es ganz umschließt. Daher der Name Fresszelle: es sieht aus, als würde das Influenza-Virus von der Zelle „aufgefressen“. Dabei entsteht aus der Zellmembran der Fresszelle eine sogenannte Vakuole, die das Influenza-Virus enthält und sich innerhalb der Fresszelle befindet. Das kannst du dir so vorstellen, als wären nun mehrere Schachteln ineinander gesteckt: Ganz außen die Fresszelle und darin die Vakuole und der Zellkern der Fresszelle. In der Vakuole befindet sich dann das Influenza-Virus.

V Fresszellen präsentieren die Antigene des Influenza-Virus

Nachdem das Influenza-Virus von der Fresszelle „aufgefressen“ wurde, wird es im Inneren der Vakuole in seine Bausteine zersetzt. Auch die Glykoproteine des Influenza-Virus bestehen aus mehreren Bausteinen. Ein Baustein der Glykoproteine sind die Antigene. Antigene sind für jedes Virus charakteristisch. Das heißt, das Influenza-Virus besitzt andere Antigene als zum Beispiel ein Herpes-Virus. Wenn das Influenza-Virus von der Fresszelle „aufgefressen“ worden ist, „präsentiert“ diese Fresszelle die Antigene des Influenza-Virus auf ihrer Zellmembran. In unserem Beispiel stellen die vollständigen Pfeile die Glykoproteine und die Pfeilspitzen die Antigene dar. Wenn die Fresszelle die Antigene präsentiert, ist ihre Zellmembran sozusagen von diesen Pfeilspitzen der Glykoproteine besetzt. Die Spitzen zeigen dabei von der Fresszelle weg, so als hätte sie Dornen.

VI Eine T-Helferzelle bindet an die Fresszelle

Wie du bereits erfahren hast, unterscheiden sich die Antigene je nach Virus. Dementsprechend besitzen Herpes-Viren andere Antigene als Influenza-Viren. Je nachdem, welches Virus eine Fresszelle aufgefressen hat, präsentiert sie die entsprechenden Antigene auf ihrer Zellmembran. Die Fresszelle, die ein Influenza-Virus gefressen hat, präsentiert also Antigene der Influenza-Viren auf ihrer Zellmembran.

So wie es verschiedene Antigene gibt, gibt es auch unterschiedliche T-Helferzellen im Körper. Auch T-Helferzellen sind von einer Zellmembran umgeben und tragen in ihrem Inneren einen Zellkern. In der Membran jeder T-Helferzelle sind bestimmte Proteine verankert. Diese Proteine passen zu bestimmten Antigenen. So gibt es z.B. T-Helferzellen, deren Proteine wie ein Schloss zu einem Schlüssel genau zu den Antigenen auf der Fresszelle passen, die das Influenza-Virus gefressen hat. Über diese Proteine entsteht eine Bindung zwischen T-Helferzelle und Fresszelle. Diese Bindung kann man als Schlüssel-Schloss-Bindung bezeichnen.

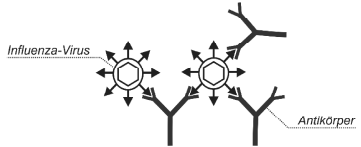
VII Antikörper verklumpen Influenza-Viren

Die Schlüssel-Schloss-Bindung zwischen den Antigenen auf der Fresszelle und der T-Helferzelle führt im Körper dazu, dass viele Antikörper hergestellt werden. Diese Antikörper kannst du dir wie kleine Ypsilons vorstellen. Jeder Y-Antikörper besitzt an beiden „Ärmchen“ jeweils eine Bindungsstelle, die wieder wie ein Schloss zu einem Schlüssel zu den Glykoproteinen auf der Hüllmembran des Influenza-Virus passt. Somit kann jeder Antikörper mindestens an zwei Influenza-Viren binden. Durch diese Bindungen entstehen Klumpen aus Antikörpern und Influenza-Viren, die der Körper vernichten kann. So wird eine Infektion weiterer Körperzellen durch Influenza-Viren vermieden.

Anhang C: Ausgewählte Beispiele der Kodiermanuale

Ausschnitt aus dem Kodiermanual zur Bewertung der während der Lernsitzung erstellten Zeichnungen

(adaptiert nach Schmeck et al., 2014)

<p>VII. Antikörper verklumpen Influenza-Viren (max. 5,5 Punkte):</p> <p>Beispielbild:</p>  <p>Allgemein: Korrekt: Mindestens ein Antikörper mit zwei Bindungsstellen bindet an Glykoproteine von zwei Viruszellen.</p> <p>Allgemein:</p> <p>7.1.1: Antikörper ist richtig dargestellt +1</p> <p>7.1.2: Virus/Viren vorhanden</p> <ul style="list-style-type: none"> • Viruselemente (Antigene, Glykoproteine, fehlerhafter Virus) wurden dargestellt +0,5 • Ein vollständiger Virus dargestellt/Mehrere fast vollständige Viren +1 • Zwei vollständige Viren dargestellt +1,5 	<p>7.2: Bindung der Antikörper an die Glykoproteine:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Antikörper bindet nicht nach Schlüssel-Schloss-Prinzip an <u>ein</u> Glykoprotein, aber grobe Bindung erkennbar +1 ▪ Drei oder mehr Viren binden nicht Schlüssel-Schloss-Prinzip an die Arme des Antigen +1,5 ▪ Antikörper bindet nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip an <u>ein</u> Glykoprotein +2 ▪ Antikörper bindet nicht nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip an <u>zwei</u> Glykoproteine verschiedener Viren, aber grobe Bindung erkennbar +2 ▪ Antikörper bindet nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip an <u>zwei</u> Glykoproteine verschiedener Viren +3 <p>Zusatz:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Überflüssige Zeichenelemente geben keine Punkte! ○ Wenn statt Glykoproteinen Antigene dargestellt wurden, werden diese bei „Bindung der Antikörper an die Glykoproteine“ als Glykoproteine gezählt ○ Sind Viren oder Virenelemente dargestellt, aber keine Bindung an den Antikörper ist erkennbar, gibt es für den Virus/die Virenelemente keine Punkte ○ Wenn nur ein Virus dargestellt ist und (mehrere) Antikörper an (mehrere) Glykoproteine eines Virus anschließen, dann nur Punkte für „Antikörper bindet nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip an <u>ein</u> Glykoprotein +2“
--	--

Ausschnitt aus dem Kodiermanual zur Bewertung der während der Lernsitzung erstellten Zusammenfassungen

(adaptiert nach Schütz, 2015²⁰)

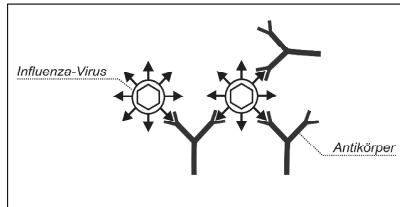
<p>VII. Antikörper verklumpen Influenza-Viren (5 Punkte)</p> <p>Aufbau</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ A 7.1: Antikörper sehen aus wie ein „Y“ +1 ▪ A 7.2*: Antikörper besitzen <u>zwei</u> Bindungsstellen / können zwei Influenza-Viren binden +1 <p>Bindung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ A 7.3: Die Bindungsstellen passen genau an die Glykoproteine der Influenza-Viren (Schlüssel-Schloss-Bindung) +2 ▪ A 7.4: Durch diese Bindung entstehen Klumpen (aus Antikörpern und Influenza-Viren) +0.5 ▪ A 7.5: Die Klumpen können vom Körper vernichtet werden +0.5 <p>* Erläuterung:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wenn bei A 7.2 nur von „einer Bindungsstelle“, „besitzt Bindungsstellen“, „besitzt an ihren Ärmchen eine Bindungsstelle“ die Rede ist, nur +0.5
--

²⁰ Schütz, V. (2015). Welche Lernstrategie ist besser? Das Erstellen von Zusammenfassungen oder von Zeichnungen? (unveröffentlichte Staatsarbeit). Universität Duisburg-Essen.

Ausschnitt aus dem Kodiermanual des Zeichentests

(adaptiert nach Schmeck et al., 2014)

4. Skizziere die **Bindung** zwischen **Influenza-Viren** und passenden **Antikörpern** (max. 4 Punkte)



A 4.1: (+0.5 – 1.5)

- Virus grob erkennbar (beliebige Form)
- oder nur Glykoprotein oder Antigen dargestellt **+0.5**
- Virus mit Glykoproteinen (beliebige Form) **+1**
- Virus mit Kapsel, Hüllmembran und pfeilförmigen Glykoproteinen **+1.5**

A 4.2: (+0.5 - 1)

- Antikörper (beliebige Form, auch in Form von T-Helferzellen) **+0.5**
- Antikörper dargestellt wie ein Y **+1**

A 4.3: (+0.5 - 1.5)

- Erkennbare Verbindung zwischen einem Antikörper und einem Virus
- oder Erkennbare Verbindung zwischen einem Antikörper und drei Viren **+0.5**
- Erkennbare Verbindung zwischen einem Antikörper und zwei Viren
- oder Schlüssel-Schloss-Verbindung zwischen Antikörper und einem Virus **+1**
- Schlüssel-Schloss-Verbindung zwischen Antikörper und zwei Viren **+1.5**

Zusatz:

- Virus in einem Antikörper: Punkte für Virus, Punkte für Antikörper (wenn als solcher erkennbar), KEINE Punkte für eine Verbindung
- Wenn Virus offensichtlich mit anderen Elementen verwechselt wurde (z.B. Fresszelle): keine Punkte für Virus
- Mehrere Antikörper oder mehr als zwei Viren geben keine Zusatzpunkte: wichtig sind die Verbindungen von den Antikörpern bezüglich der Viren
- Viele Antikörper und viele Viren/ein Virus auf einem Haufen: Keine Punkte für Bindung
- Wenn Antikörper den Virus umschließen: keine Bindung